

---

**Lew Pawlowitsch Teplow**

**Grundriss der Kybernetik  
Ein populärwissenschaftlicher Überblick**

Übersetzung und Bearbeitung: Oskar Mader, Konrad Gröger

Ergänzungen: Peter Starke, Heinz Kuchling

Illustrationen: Harri Parschau

1967 Volk und Wissen Berlin

MSB: Nr. 31

Abschrift und LaTeX-Satz: 2021

<https://mathematikalpha.de>

---

## Vorwort zur deutschen Ausgabe

Angesichts der steigenden Bedeutung, die die Kybernetik für die moderne Wissenschaft und Produktion erlangt hat, ergibt sich für einen ständig wachsenden Kreis von Menschen die Notwendigkeit, die wichtigsten Begriffe und Denkmethode der neuen Wissenschaft "Kybernetik" kennenzulernen.

Es besteht kein Zweifel darüber, dass die wesentlichsten Erkenntnisse dieser Wissenschaft schon in der nächsten Zukunft zur Allgemeinbildung gehören werden. Das Buch des sowjetischen Kybernetikers Lew Teplov erschien dem Verlag und den Bearbeitern gut geeignet, einen breiten interessierten Leserkreis in grundlegende kybernetische Gedankengänge einzuführen.

In unserer Zeit ist das Tempo der Wissenschaftsentwicklung stark gestiegen. Diese Tendenz lässt sich besonders leicht am Beispiel der Kybernetik aufzeigen. Viele kybernetische Hypothesen, die erst vor kurzer Zeit aufgestellt wurden, sind heute bereits bestätigt oder widerlegt, zahlreiche Ansätze haben zu bedeutenden Ergebnissen geführt oder sind als fruchtlos erkannt worden.

An dieser Entwicklung durften und konnten die Bearbeiter des sowjetischen Originals nicht vorübergehen. Daher ist die hiermit vorgelegte deutsche Fassung des Buches von Teplov nicht einfach eine Übersetzung, sondern muss als Bearbeitung gekennzeichnet werden.

Die Bearbeiter haben sich, der erwähnten Tendenz Rechnung tragend, bemüht, die neuesten Ergebnisse der Kybernetik, soweit das mit den Absichten des Autors verträglich schien, in das Buch aufzunehmen. Das gilt in besonderem Maße für die Terminologie.

In diesem Buch wurden die Bezeichnungen in dem Sinne gebraucht, in dem sie in der deutschsprachigen wissenschaftlichen Literatur benutzt werden.

Bei der Bearbeitung machten sich wesentliche Änderungen nur an zwei Stellen erforderlich. Zum einen musste das Kapitel "Modelle" neu verfasst werden, um dem modernen Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Mathematischen Logik gerecht zu werden.

Zum anderen zeigte sich die Notwendigkeit, das Kapitel "Kybernetik und Mensch", in dem die philosophischen Aspekte der Kybernetik behandelt werden, zu überarbeiten. Dabei ließen sich die Bearbeiter von der Tatsache leiten, dass es unmöglich ist, schon heute eine endgültige philosophische Einschätzung der sich rasch entwickelnden Kybernetik zu geben.

Es darf nicht verschwiegen werden, dass auch unter marxistischen Philosophen recht unterschiedliche Auffassungen zu den in diesem Buch angeschnittenen philosophischen Problemen existieren. Die Bearbeiter haben versucht, offene Fragen als solche kenntlich zu machen und ihrer wissenschaftlichen Beantwortung durch die marxistische Philosophie nicht vorzugreifen.

Wir hoffen, dass dieses Buch einen positiven Beitrag zu einer modernen Allgemeinbildung leistet.

Die Bearbeiter der deutschen Ausgabe

Berlin, im Mai 1965

## Inhaltsverzeichnis

1	Die Kybernetik, ihr Platz im Leben und unter den Wissenschaften	4
2	Die Unwahrscheinlichkeit, ein mathematisches Maß der Mühe und der Kenntnis	15
3	Die Steuerung, die Anatomie der Mausefalle und des interplanetaren Roboters	27
4	Vollprogrammierte Automaten	42
5	Die Rückkopplung, die Grundlage des Automatismus in Natur und Technik	52
6	Die Information, im wesentlichen der einzige Gegenstand der Kybernetik	70
7	Die Informationssammlung, sie bedeutet Fortschritt, Entwicklung, Vervollkommnung	98
8	Kontrolle, eine der Eigenschaften der Rückkopplung	124
9	Verhalten, eine neue Art der Anpassung	140
10	Modelle, in ihnen spiegeln wir die Welt wider	159
11	Signalwandler, aus ihnen setzt sich jede automatische Maschine zusammen	177
12	Informationsverarbeitende Maschinen, sie vergleichen, klassifizieren, analysieren und rechnen, ja sie spielen sogar	204
13	Automatisches Rechnen, eine der bemerkenswertesten Errungenschaften unserer Zeit	234
14	Stochastische Maschinen, sie besitzen einen "freien Willen" und sind fähig zu abstrahieren	257
15	Das Gehirn, Vermutungen und Fakten über die Funktionsweise eines lebenden stochastischen Systems	280
16	Vollständige Automaten, selbständige Systeme aus zwei Maschinen: einer informationsverarbeitenden und einer handelnden	303
17	Kybernetik und Mensch, ein philosophischer Abschluss eines wissenschaftlich-technischen Buches	329
18	Literatur	348

# 1 Die Kybernetik, ihr Platz im Leben und unter den Wissenschaften



Macht Geld glücklich? - Ein Interview mit einem alten Römer - Automaten weisen den Weg zum Überfluss - Experiment und mathematische Analyse - zwei Kennzeichen der Wissenschaft - Die Herkunft des Wortes "Kybernetik" - Was bedeutet das Wort "Automat"? - Gegenstand und Methode der Kybernetik.

Unlängst habe ich zugesehen, wie eine Maschine Geld druckt. Große Bögen, ein Bild des Rubelscheins neben dem anderen, bunten Tapeten ähnlich, kamen aus dem dunklen Inneren der Maschine an das grelle Lampenlicht. Mechanische Finger fassten behutsam zu, wendeten die Bögen um und stapelten sie auf.

Nicht im Geld liegt das Glück. Jugend, Gesundheit, gute Freunde, wahre Liebe und Arbeitserfolge sind nicht käuflich. Aber man kann so viele angenehme und nützliche Dinge für Geld erwerben, und das Geld reicht dazu oft nicht aus, dass sich manchmal der Gedanke einschleicht: Könnte man nicht mehr solcher Maschinen zum Druck von Banknoten aufstellen und sie schneller laufen lassen, damit wir alle mehr von ihrer begehrten Produktion erhalten können?

Was würde geschehen? Mit dem erhaltenen Geld würde jeder sofort die Warenhäuser aufsuchen, um dort nach seinen Wünschen einzukaufen. Geld ist aber nicht einfach bedrucktes Papier, sondern eine Anweisung der Gesellschaft über einen bestimmten Anteil an der Gesamtproduktion und dieser Anteil kann nur dann erhöht werden, wenn sich das Gesamtaufkommen an Gütern und Dienstleistungen vergrößert.

Derjenige, der zufällig zu spät ins Warenhaus käme, würde vor leeren Regalen stehen und an den Ausgängen des Warenhauses vielleicht zweifelhafte Personen antreffen, die die Waren nun für den doppelten oder dreifachen Preis feilhalten.

Durch eine solche Maßnahme würde nicht der Lebensstandard verbessert, sondern das Geld entwertet, die Warenverteilung gestört und das Spekulantentum gefördert werden.

Könnte nicht ein anderes Verfahren zur Steigerung der Produktion, zur Vergrößerung des zu verteilenden gesellschaftlichen Reichtums erprobt werden?

An jeder Uhr gibt es einen Hebel zum Verstellen der Ganggeschwindigkeit. Es ist möglich, den Gang der Uhr zu beschleunigen, etwa je Stunde um 15 Minuten. Nach einer Stunde würde die Uhr dann eine Viertelstunde vorgehen. Nimmt man diese Verstellung um Mitternacht vor, so zeigt die Uhr um 7 Uhr bereits 8.45 Uhr. Sind alle Uhren eines Landes so in gleicher Weise eingestellt, dann gibt es nicht einmal organisatorische Unstimmigkeiten in der Wirtschaft, im Verkehr und im Nachrichtenwesen.

Fast unmerklich würde sich die Geschwindigkeit aller Maschinen erhöhen, würde der Lebensrhythmus allgemein schneller werden. In den sieben "normalen" Stunden, die jeder von uns im Durchschnitt täglich arbeitet, würden mehr Produkte erzeugt, beispielsweise mehr Häuser gebaut werden. Und der Anteil eines jeden Werktätigen am allgemeinen Reichtum würde sich erhöhen, und dieser Reichtum, im ganzen betrachtet, natürlich auch.

So weit, so gut. Aber es gibt Dinge, die sich nicht so wie eine Uhr durch einen Hebel verstellen lassen. Dazu gehört vor allem unser eigener Organismus. Am Ende eines solchen "falschen" Arbeitstages wäre der Mensch viel stärker ermüdet als heute, und der für diesen Preis erkaufte Reichtum würde ihn kaum zufriedenstellen.

Die Ganggeschwindigkeit der Uhren hätte auch keinerlei Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen und Tiere, insbesondere auf das Wachstum der Kulturpflanzen und Haustiere. Daher führt diese Art der Intensivierung der Arbeit nicht zum gewünschten Ziel.

Stellen wir uns vor, dass sich die gesamte Produktion in einem Staat auf einen Schlag verdoppeln würde. Dazu müssten wir neben jeder Fabrik eine gleichartige zweite bauen, neben jedem Getreidefeld ein gleich großes zweites anlegen usw. Doppelt soviel Kohlengruben, Elektrizitätswerke, fruchtbringendes Land - das bedeutet doppelt soviel Elektroenergie, Textilien und Nahrungsmittel. Und einen doppelt so großen Anteil für jeden einzelnen - nicht wahr?

Es zeigt sich aber, dass ein solcher Schluss unberechtigt ist. Denn in jeder neuen Fabrik, auf jedem neuen Feld müssten Menschen tätig sein, Industriearbeiter und Bauern, die den gleichen Anspruch auf einen Anteil am Gesamtprodukt wie wir selbst hätten. Sie verbrauchten das, was sie erarbeitet haben, selbst, so dass sich durch ihre Arbeit der Anteil der anderen Menschen nicht vergrößert.

Dieses Beispiel zeigt, dass es nicht nur allgemein auf das Anwachsen der Produktion ankommt, sondern auf die Steigerung der Produktion relativ zur Anzahl der Werktätigen. Auch können neue Fabriken, Betriebe und Felder, die ohne Arbeitskräfte bleiben, sicherlich nicht zu jener Vergrößerung des Reichtums beitragen, mit der wir gerechnet haben.

Was ist also zu tun?

Offensichtlich muss die Produktion erhöht und gleichzeitig der Anteil der menschlichen Arbeit an der Produktion gesenkt werden. Würde ein Bewohner des alten Rom in unserem zwanzigsten Jahrhundert auferstehen und wir zeigten ihm, wie wir heute leben, so wäre er ohne Zweifel überrascht.

- "Und das ist alles, was ihr in zweitausend Jahren erreicht habt?" würde er fragen. "Bei uns damals war alles viel reicher und schöner. Stellt euch vor: Patrizier in purpurnen Gewändern nehmen auf weichen Ruhelagern das Mittagessen ein, Rosenblätter fallen von der Decke herab, man reicht erlesene Speisen, wie Nachtigallenzungen ..."

Ihm fiel nicht auf, was wir essen und wie wir uns kleiden. Aber er würde wahrscheinlich gar nicht begreifen, dass wir ohne Sklaven auskommen können, die seinerzeit für wenige Auserwählte alle Arbeit tun und Dinge herstellen mussten, die bei uns heute Millionen besitzen.

- "Wer erzeugt denn für euch diese feinen und haltbaren Gewebe, wer macht die Bücher, das Licht auf den Straßen und die Musik in den Häusern?" würde der "alte" Römer, der die Nachtigallenzungen vielleicht nur gesehen, aber niemals gegessen hat, erstaunt fragen. - "Ihr selbst? Wie kann denn ein einzelner Mensch für sich selbst soviel herstellen?"

Dann würden wir ihm unsere Helfer zeigen: die Maschinen. Wir würden ihm erklären, dass die Maschinen im Sozialismus mit seiner unbegrenzten ökonomischen Perspektive ihre eigentliche Bestimmung erlangt haben: sie sollen den Reichtum des Volkes vermehren und die Arbeit der Menschen erleichtern.

Der Konstruktion und Herstellung dieser Maschinen widmen Wissenschaftler, Ingenieure und Arbeiter ihre schöpferischen Kräfte. Wir würden dem Römer zeigen, was wir für notwendig und auch für möglich halten: jedem allen Wohlstand zu sichern, jedem ohne Ausnahme, ohne Rücksicht auf seine Stellung in der Gesellschaft, seine Nationalität, seine Herkunft, sein Alter und sein Geschlecht, mit anderen Worten, wir würden ihm die größte und verdienstvollste Aufgabe erläutern, die sich die Menschheit überhaupt stellen kann.

Und deshalb ist unser Gespräch über die Zukunft meistens ein Gespräch über die Technik. Wir müssen uns darüber Klarheit verschaffen, auf welchen Prinzipien unsere Helfer - die Maschinen - beruhen, was sie leisten können und was sie nicht leisten können.

Vielfach wird die Leistungsfähigkeit einer Maschine nach ihrem Energieumsatz, nach ihrer Produktivität, nach ihrer physikalischen Leistung eingeschätzt. Werden aber viele Arbeiten deshalb von Menschen ausgeführt, weil entsprechend leistungsstarke Maschinen fehlen? Sicherlich nicht.

Eine zuverlässige Maschine zum Säubern eines Zimmers, zum Ausbessern eines Kleidungsstückes oder zum Ausführen einer Blinddarmoperation herzustellen ist unvergleichlich schwieriger als die Konstruktion eines Riesenbaggers, der in einer Minute fünfzig Tonnen Gestein ausheben kann.

Beim Einsatz eines solchen Baggers ist aber auch noch menschliche Arbeit notwendig: in der Kabine sitzt der Baggerführer und bedient verschiedene Hebel. Durch den Bagger wird also die zum Bewegen von Gestein nötige menschliche Arbeit nicht vollständig ersetzt, der Bagger ist kein Automat.

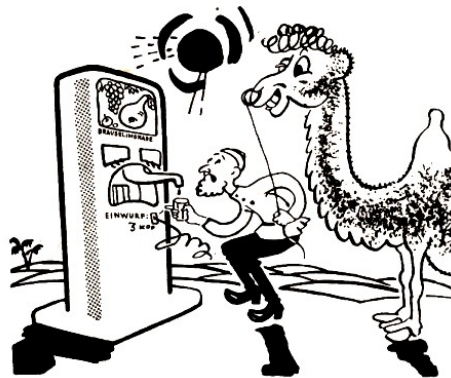


Bild 1.1.: Ein defekter Automat enttäuscht, doch sollte man daraus nicht auf eine Begrenzung der Möglichkeiten schließen, die Automatismen bieten.

Wenn in unserem Buch auch über die verschiedenartigsten Dinge gesprochen wird, wenn nicht alltägliche Gegenstände in das Blickfeld des Verfassers und der Leser rücken, so werden wir uns dennoch - soweit möglich - hauptsächlich einer einzigen Frage widmen: Was ist ein Automat?

Leider wird das Wort "Automat" oft nicht sinngemäß, manchmal sogar direkt falsch verwendet. Durstig vom Aufenthalt in der Sonnenhitze, hat ein Mensch eine Münze in einen Getränkeautomaten geworfen. Als er merkt, dass dieser Automat defekt ist, sagt er sich tröstend -: "Da kann man nichts machen, ein Automat ist eben keine Verkäuferin, mit dem kann man sich nicht streiten."

Ein andermal fährt ein Mensch gedankenverloren mit der Untergrundbahn in die falsche Richtung; er hatte sich wie immer in den Zug gesetzt, mit dem er täglich zur Arbeit zu fahren gewöhnt ist. Als er seinen Irrtum feststellt, meint er, wie ein Automat gehandelt zu haben. Als einmal ein Beobachter in einem Stadion Sportler sah, die auf Kommando im Gleichtakt ihre Übungen ausführten, ging ihm der Vergleich mit Automaten durch den Kopf.

Aber der Durstige hatte es nicht mit einem Automaten schlechthin zu tun, sondern mit einem defekten, nicht funktionsfähigen Automaten. Es ist durchaus möglich, dass bei solcher Gluthitze auch einer Verkäuferin ein Fehler unterläuft. Eine Verkäuferin würde allerdings ihren Fehler korrigieren, das wiederum kann der Getränkeautomat nicht. Er funktioniert entweder oder versagt.

Im zweiten Fall identifiziert sich der Mensch nur mit einer der verschiedenen Automatenarten, nämlich mit einem programmgesteuerten Automaten, und lässt dabei außer acht, dass es auch Automaten mit anderen Eigenschaften gibt.

Das dritte Beispiel lässt einen Vergleich mit Automaten nicht zu. Die Sportler führen wie Maschinen gewisse Kommandos aus, ihre Bewegungen werden von jemandem gesteuert. Ein Automat unterscheidet sich aber von einer gewöhnlichen Maschine gerade dadurch, dass er etwas selbständig auszuführen vermag, d.h., dass er sich selbst steuert.

Die Meinung, dass jeder Automat, wie seine Konstruktion und seine Funktionsweise auch sei, sich stets vom Menschen dadurch unterscheidet, dass der Automat prinzipiell geistlos, stumpfsinnig und stur ist, entstand nicht zufällig.

Selbst die ganz "klugen" Maschinen, mit denen wir es heute in Industrie, Landwirtschaft und im täglichen Leben zu tun haben, sind noch weit von ihrer Vollkommenheit entfernt. Wenn eine Maschine schlecht gesteuert wird, so kann sie den Menschen gefährden, die Produkte verderben und sich selbst beschädigen. Überall an den Maschinen gibt es Knöpfe, Handgriffe, Skalen, und überall an den nicht denkenden Maschinen stehen denkende Menschen. Sie verbringen Stunde um Stunde und Tag um Tag damit, die Tätigkeit der Maschinen zu überwachen und unerwünschte Folgen ihrer Unzulänglichkeiten zu verhindern.

Wird dieser Zustand ewig bestehen bleiben?

Einige mögen das bejahen; denn - so argumentieren sie - die Automaten sind leblose, geistlose, künstliche Gebilde und müssen, so kompliziert sie auch sein mögen, stets mit Verstand bedient werden, wenngleich auch nur durch das Drücken von Knöpfen. Andere wiederum könnten davon überzeugt sein, dass die Ingenieure und Arbeiter mit der Zeit bessere Automaten bauen werden, die vollkommen selbständig arbeiten und sich in den Pausen Anekdoten erzählen.

Über dieses Thema kann man lange streiten. Ein Ergebnis ist zur Zeit dabei kaum zu erwarten, weil unklare Vorstellungen dort recht wenig helfen, wo es auf genaue, strenge, vollständig begründete Aussagen ankommt, wo die Ergebnisse einer Wissenschaft notwendig sind.

Von alters her ordnet die Menschheit ihr Wissen von der einheitlichen Welt in verschiedene Wissenschaften. Unter diesen Einzelwissenschaften gibt es z.B. die Arachnologie, die Wissenschaft von den Spinnen, die Genealogie, die Wissenschaft von den Stammbäumen der Menschengeschlechter (Familienforschung), die Sphragistik, die Siegelkunde, die Teratologie, die Lehre von den Missbildungen der Lebewesen, und viele andere. Es vergeht kaum ein Jahr, in dem nicht irgendein neuer Wissenschaftszweig entsteht.

Wie Fächer in Regalen, so ordnen sich "verwandte" Wissenschaften in Wissenschaften höherer

Ordnung ein. Eine solche Wissenschaft ist z.B. die Physik, die unser Wissen über die mechanische Bewegung, die Wärme, die Elektrizität und den Atombau zusammenfasst - über Gebiete also, denen man zunächst gar nicht ansieht, dass sie zusammengehören.



Bild 1.2.: Der künstlich erzeugte Blitz hat dem Physiker mehr gesagt als alle Abhandlungen über diese Naturerscheinung.

Die Physik hat jene Etappe der Wissenschaftsentwicklung durchlaufen, die - wie Friedrich Engels schrieb - "von niederen zu immer höheren Stufen der Erkenntnis aufsteigt, ohne jemals durch Ausfindung einer sogenannten absoluten Wahrheit zu dem Punkt zu gelangen, wo sie nicht mehr weiter kann ..."<sup>1</sup>

Im Laufe dieser Entwicklung wurden zwei sehr allgemeine und wirksame Forschungsmethoden erarbeitet: das Experiment und die mathematische Analyse.

Dem Wissenschaftler genügt nicht allein die Beobachtung, dass sich ein Körper bei Erwärmung ausdehnt, sondern ihn interessiert die Hypothese, dass sich der Körper deshalb ausdehnt, weil er aus sich bewegenden Molekülen besteht. Der Wissenschaftler versucht, ein quantitatives Gesetz zu finden, nach dem man vorausbestimmen kann, um wieviel Zentimeter sich ein Eisenstab gegebener Länge bei einer gegebenen Erwärmung ausdehnt.

Er fertigt einen solchen Stab an, erwärmt ihn und stellt dabei fest, dass er sich eben um soviel ausgedehnt hat, wie vorausberechnet wurde.

Eine einfache, aber bedeutsame Anordnung von Symbolen - die Formel - wird für ihn zum Schlüssel, der die Längenausdehnung bei jeder beliebigen Erwärmung an jedem beliebigen Ort zu bestimmen ermöglicht.

Von dieser physikalischen Erkenntnis führt ein Weg zur Philosophie, denn es zeigt sich, dass jedem Körper eine innere Bewegung eigen ist, in unserem Falle eine Molekularbewegung, die Wärmebewegung; von hier aus führt aber auch ein Weg zur Praxis, denn der Ingenieur kann im Voraus bestimmen, mit welcher Längenänderung bei dem von ihm konstruierten Brückenträger gerechnet werden muss. Berücksichtigt er das nicht, kann die Brücke durch diese Längenänderung zerstört werden.

Bei einer Betrachtung der Beziehungen zwischen der Physik und der Technik darf man nicht übersehen, dass der Begriff "Maschine" in beiden Disziplinen in ganz verschiedener Bedeutung verwendet wird.

Der Ingenieur konstruiert eine praktische nützliche, möglichst billige Maschine von gefälligem Äußeren. Die "Maschine", die der Physiker ersinnt, hat nicht den Zweck, praktische Arbeit zu verrichten, sie bildet vielmehr ein abstraktes Modell der untersuchten Zusammenhänge, eine

---

<sup>1</sup>Friedrich Engels: Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie. Dietz Verlag, Berlin 1950, Seite 8.



von allen bei Experimenten unvermeidbaren Nebenbedingungen und -erscheinungen gereinigte Vorstellung, die das Wesen der Dinge zum Ausdruck bringt.

Die Entdeckungen der Physik werden in der Technik angewendet; dabei überlässt der Physiker die praktische Nutzung der von ihm entdeckten Naturgesetze anderen. Die Herstellung von elektrischen Bügeleisen, von Fernsehgeräten und von Ultraschall-Waschmaschinen kann man nicht als Gegenstand der Physik ansehen. Die eben genannten Geräte gingen, wie viele andere Maschinen auch, ursprünglich aus physikalischen Versuchseinrichtungen hervor.

Die physikalischen Einrichtungen waren Mittel und Frucht der Erkenntnis; ihre Nachfolger wurden zu unseren Helfern. "Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie", sagte einmal der Physiker Ludwig Boltzmann



Bild 1.3.: Der amerikanische Mathematiker Norbert Wiener entwickelte eine einheitliche theoretische Grundlage jener Wissenschaften, die sich mit der Natur der Automatismen und mit den Automatismen in der Natur beschäftigen.

Im Jahre 1948 hat ein bedeutender Mathematiker unserer Tage Norman Wiener (1894-1964), aufgezeigt, dass eine Wissenschaft noch höheren Ranges als die Physik existiert, eine Wissenschaft also, die allgemeiner als andere Wissenschaften ist, aber wie jede dieser Wissenschaften, etwa die Physik, eine strenge innere Ordnung hat.

Kybernetik - so nannte Norbert Wiener diese Wissenschaft, deren Name sich vom altgriechischen Wort "kybernetes", das - übersetzt - "Steuermann" oder "Lotse" bedeutet, herleitet.

In den Werken antiker Schriftsteller, vor allem in den Dialogen Platons, bezeichnete das Wort "Kybernetik" die Wissenschaft von der Verwaltung der Provinzen, also einen eng begrenzten Bereich der Politik.

Im Jahre 1840 wurde Ampère, als er die Wissenschaften zu klassifizieren versuchte, auf diese "Kybernetik" aufmerksam; er ordnete sie unter die Gesellschaftswissenschaften ein.

Die Kybernetik verwendet experimentelle Methoden wie die Physik oder die Chemie. Schon ihr Name kennzeichnet sie als Wissenschaft von Steuerung, Regelung, Nachrichtenverarbeitung und den Eigenschaften hochorganisierter Systeme.

Obgleich die Physik höchst allgemeine Eigenschaften der Materie untersucht, ist bereits seit langem bekannt, dass mit Hilfe der physikalischen Gesetze allein nicht alle Eigenschaften der Welt geklärt werden können; die Physik ist also nicht die "Wissenschaft aller Wissenschaften". Je komplizierter die Vorgänge sind, desto mehr treten ihre besonderen, nicht auf physikalische Prinzipien zurückführbaren, sozusagen emergenten<sup>2</sup> Eigenschaften in Erscheinung.

Im folgenden werden wir uns davon überzeugen, dass auch die Gesetze der Steuerung, Regelung und der Nachrichtenverarbeitung, die von der Kybernetik untersucht werden, nicht die allgemeinsten, für die Erforschung der Welt grundlegenden Gesetzmäßigkeiten sind.

Es gibt Erscheinungen, bei denen keine gesteuerten Prozesse vorkommen und auf die deshalb die Kybernetik nicht angewendet werden kann. Auch die Kybernetik ist also nicht die "Wis-

---

<sup>2</sup>"emergent", soviel wie "aus dem Verborgenen auftauchend".

senschaft aller Wissenschaften".

Um gesteuerte von nicht gesteuerten Vorgängen unterscheiden zu können, stützen wir uns auf den Begriff der Zielstrebigkeit. Deswegen kann man die Kybernetik auch als die Wissenschaft von der Zielstrebigkeit, von den sich zielstrebig - oder, mit einem anderen Wort: zweckmäßig - verhaltenden Systemen bezeichnen.

Die Steuerung eines Systems kann von außen her erfolgen: Geschwindigkeit und Fahrtrichtung eines Kraftwagens werden vom Fahrer bestimmt. Aber die Steuerung kann auch vom System selbst vorgenommen werden. In diesem Falle sprechen wir von automatischer Steuerung oder einem Automatismus und nennen das betreffende System einen Automaten. Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, sind das Gehirn und die elektronische Rechenmaschine zwei von den vielen möglichen Systemen mit automatischer Steuerung, also Automaten.

Es ist möglich, dass jemand mit einer solchen Anwendung des Ausdrucks "Automat" nicht einverstanden ist, weil hierbei zu den Automaten auch Lebewesen und sogar den Mensch gerechnet werden.

Gewöhnlich wird unter einem Automaten etwas Totes, "Seelenloses" verstanden, das keine wechselnden, verschiedenartigen, anspruchsvolleren Tätigkeiten auszuführen vermag. Aber das Wort "Automat"; es bedeutet "selbsttätig" besagt nichts anderes, als dass dieses System irgend etwas selbst, d.h. ohne lenkende Einwirkung von außen, ausführt.

Ohne wissenschaftliche Analyse kann man nicht sagen, was Automaten können, was sie nicht können und was sie niemals können werden. Voraussetzung einer solchen Analyse ist, dass zunächst die Wesenszüge der sich selbst steuernden Systeme erkannt und zum Forschungsgegenstand einer neuen Disziplin zusammengefasst werden. Um dafür kein neues Wort erfinden zu müssen, benutzen wir den bekannten Ausdruck "Automat", und zwar in seinem ursprünglichen, wörtlichen Sinn.

Ein System, das kein Automat ist, wie z.B. ein Kraftwagen, wird bei seiner praktischen Verwendung von einem anderen System, z.B. von einem Menschen, gesteuert.

Eine Analyse des zu steuernden Systems allein, in unserem Beispiel also eine Analyse dessen, wie das Steuerungssystem eines Kraftwagens funktioniert, ist für die Kybernetik kaum von wesentlicher Bedeutung. Dagegen ist der zusammengesetzte Komplex aus steuerndem System (dem Menschen) und gesteuertem System (dem Kraftwagen) ein Gesamtsystem, dem Zielstrebigkeit nicht abgesprochen werden kann, und wird daher von der Kybernetik analysiert.

Dieses Gesamtsystem ist offenbar in der Lage, eine bestimmte Tätigkeit selbständig durchzuführen, es ist ein Automat. Allgemein können wir sagen, dass ein Automat ein System ist, das sich aus untereinander verbundenen Teilsystemen aufbaut, die einander steuern, wobei unter diesen Teilsystemen wenigstens eines ist, das eine automatische Steuerung besitzt. Deshalb kann man die Kybernetik auch als Wissenschaft von der Natur der Automatismen und den Automatismen in der Natur - kurz: als Theorie der Automaten - definieren:

Die Kybernetik ist die Wissenschaft, die Zielstrebigkeit und automatische Steuerung (Automatismus) in Natur und Technik mit Hilfe von Mathematik und Experiment untersucht.

Wenn man die Kybernetik allein als Wissenschaft von der Zielstrebigkeit betrachtet, dann verabsolutiert man eine ihrer wesentlichen Seiten: ihre Beziehungen zur Philosophie. Über die Kategorien "Ziel", "Zweck", "Zielstrebigkeit", "Zweckmäßigkeit" gibt es seit alter Zeit einen erbitterten Streit zwischen dem Materialismus und dem Idealismus; so wird bei jedem Versuch der idealistischen Philosophie, die Religion mit der Wissenschaft zu versöhnen, mit den Begrif-

fen "Ziel" und "Zweck" operiert.

Sieht man dagegen die Kybernetik allein als Wissenschaft vom Automatismus an, so betrachtet man wiederum nur eine ihrer wesentlichen Seiten: ihre Beziehungen zur Praxis. Der Bau automatischer Maschinen ist schon heute ohne eine systematische Theorie unmöglich.

Die Zeiten sind vorüber, da ein einzelner Erfinder den gesamten technologischen Prozess, der realisiert werden soll, überschauen und einen dementsprechenden Automaten ersinnen konnte.

Gegenwärtig entstehen die ersten Steuerungssysteme, die als "Berater" des Menschen fungieren und die "Aufsicht" über andere Maschinen ausüben können. Es ist möglich, Maschinen zu bauen, die ein Gedächtnis haben und logische Operationen ausführen, die aus ihren Fehlern lernen und Voraussagen treffen.

Die Konstruktionsprinzipien und die Arbeitsweise dieser Maschinen hängen nicht von den technologischen Bedingungen ihres konkreten Einsatzbereichs ab, z.B. kann die gleiche Maschine das Bohren von Löchern, das Pressen von Platten oder die Arbeit eines Elektrizitätswerks steuern.

Die Kybernetik weist nach, was solche Maschinen leisten können, und gibt dadurch dem schöpferischen Denken des Ingenieurs Richtung. Die Kraft der Theorie liegt darin begründet, dass sie - indem sie Vergangenes, Gegenwärtiges und Zukünftiges miteinander vergleicht und verknüpft - uns die Grundzüge möglicher realer Lösungen aufzeigt.

Sie untersucht das Allgemeine in den Automaten, so verschieden auch deren Zwecke sein mögen, und sie befreit uns von der Mühe, bereits Erkanntes nochmals entdecken zu müssen. Sie zeigt uns die Grenzen des jeweils Möglichen und bewahrt uns damit vor vergeblichem Kraft- und Materialaufwand.

Überdies hat die Kybernetik den Ingenieuren zahlreiche fertige Automaten hoher Vollkommenheit demonstriert, nämlich die Tiere und nicht zuletzt die Menschen selbst. Aus anatomischen Präparaten, aus Protokollen über Experimente mit Versuchstieren, ebenso aus den Gesetzen der Vererbung wurden Modelle für die schöpferische Anwendung kybernetischer Prinzipien entwickelt und viele fruchtbare technische Ideen angeregt.

Manchmal wird behauptet, dass die Kybernetik Analogien zwischen der Maschine und dem Lebewesen untersuche, und da Analogien niemals vollkommen schlüssig sind, sei sie keine exakte, vollgültige Wissenschaft. Das ist offensichtlich falsch.

Die Kybernetik untersucht solche Forschungsobjekte wie die Information und ihre Gesetze, das Gedächtnis, die Informationsverarbeitung und anderes. Sie analysiert diese Gegenstände selbst und nichts ihnen Analoges, auch dann, wenn diese in den verschiedenartigsten automatischen Systemen realisiert sind. Der Sauerstoff der Luft und der Sauerstoff, der künstlich durch chemische Zerlegung von Wasser gewonnen wird, sind nicht analoge, sondern gleiche Stoffe; die Elektrizität in der Taschenlampe und die Elektrizität in den Organen des Zitterrochen gehören der gleichen Energieform an. Das Hebelgesetz der Mechanik gilt für Hebebäume genauso wie für das Knochen-Muskel-System der menschlichen Arme.

In Wirklichkeit sieht es so aus: Wenn wir den Bau und die Funktionsweise lebender Organismen untersuchen, so stoßen wir auf Gesetzmäßigkeiten eines Automatismus, der von diesem Organismus realisiert wird. Wir formulieren diese Gesetze mit Hilfe abstrakter Begriffe, die sich auf alle Systeme solcher Art beziehen.

Aus den erhaltenen Formeln ist dann nicht mehr zu ersehen, ob es sich um belebte oder um unbelebte Systeme handelte. Um die Richtigkeit der aufgefundenen Zusammenhänge und Gesetze zu überprüfen, schaffen wir ein vereinfachtes Modell des Automaten, das nur den betreffenden

Zusammenhang, das betreffende Gesetz zu demonstrieren hat und frei von überflüssigen und nebensächlichen Einzelheiten ist.

In der kybernetischen Forschung unterscheiden wir zwei Richtungen.

Zum einen werden vorhandene Automaten untersucht; ihr Aufbau und das Zusammenwirken ihrer Teile stehen im Mittelpunkt des Interesses. Das Ergebnis dieser sogenannten Analyse von Automaten ist eine formale mathematische Darstellung ihrer Bau- und Funktionsweise. Zum anderen wird die Funktionsweise, d.h. eine bestimmte Tätigkeit, vorgeschrieben und dazu ein Automat konstruiert und sein Funktionieren erprobt.

Das Ergebnis der Synthese ist also ein Automat, der die vorgeschriebene Tätigkeit ausführt. Nur die Verbindung von Analyse und Synthese kann zu vollgültigen und zuverlässigen Schlüssen über den untersuchten Vorgang, den untersuchten Gegenstand führen.

Eine Analyse ist nur dann exakt, wenn sie die Erscheinung oder den Gegenstand qualitativ und quantitativ beschreibt, und zwar in logisch einwandfreien Schlussfolgerungen, die durch Experimente, eben durch die Synthese, gesichert sind.

Es ist wichtig, die Grenzen der Analyse und der Synthese richtig zu bestimmen.

Wovon wir immer sprechen mögen - von einem Gemälde Rembrandts oder von der Bequemlichkeit eines Polstersessels: Letzten Endes können wir bis zu den Molekülen und Atomen vorstoßen, aus denen diese Gegenstände bestehen. Das wäre keineswegs falsch, aber es wäre höchst überflüssig.

Für einen Mathematiker, der eine Kugel untersucht, ist es ohne Bedeutung, woraus diese Kugel besteht. Holzkugeln, Elfenbeinkugeln, Eisenkugeln und Seifenblasen sind untereinander (im Sinne der Mathematik) isomorph (d.h. haben die gleichen mathematischen Eigenschaften) und können mathematisch durch die gleichen Ausdrücke und Formeln beschrieben werden.

Auch Automaten oder ihre Hauptbestandteile sind nicht selten im Sinne der Kybernetik, d.h. in Bezug auf die von der Kybernetik untersuchten Eigenschaften, isomorph, also untereinander austauschbar in den einzelnen Steuerungssystemen, selbst wenn sie von verschiedenartiger physikalischer Beschaffenheit sind.

Isomorphe Systeme kann man einheitlich mathematisch beschreiben, viele Einzelheiten ihres Aufbaus sind dabei unwesentlich. Bei der Synthese kann man deshalb einen beliebigen Automaten anstelle eines anderen, isomorphen benutzen. Man erhält, wenn man die kybernetischen (nicht etwa auch die physikalischen) Eigenschaften des einen Automaten untersucht, die gleichen Resultate wie bei einer Untersuchung des anderen.

In diesem Fall bildet der eine Automat ein kybernetisches Modell des anderen.

Diese Methode ist nicht spezifisch für die Kybernetik, sie ist vielmehr allen exakten Wissenschaften eigen. Der Physiker, der die Gesetze der Pendelbewegung formuliert, beschreibt nicht ein bestimmtes konkretes Uhrpendel, sondern ein diesem im Sinne der Physik isomorphes mathematisches Modell.

"Ein reales Pendel", so schreibt der bekannte englische Kybernetiker W.R. Ashby, "hat nicht nur Länge und Lage, sondern auch Masse, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Dichte, kristalline Struktur, Elastizität, chemische Eigenschaften, eine gewisse Radioaktivität, Geschwindigkeit, Reflexionsvermögen, Festigkeit, es ist von einer Feuchtigkeitsschicht umgeben und mit Bakterien besetzt.

Alle diese Fakten zu untersuchen, ist praktisch nicht möglich, und niemandem fiel ein, so etwas zu beginnen. Wir brauchen auch nur solche Fakten zu untersuchen, die für unser eben

genanntes Ziel von Interesse sind.<sup>3</sup>

Das Experiment erhärtet oder verwirft die vermutete Gesetzmäßigkeit, gleichzeitig hilft es uns, die untersuchte Erscheinung genauer zu erfassen und vollkommener zu verstehen.

Natürlich kann das Studium einer elektronischen Rechenmaschine jene Eigenschaften der Gehirntätigkeit nicht enträtseln, die diese Maschine selbst nicht besitzt, ebensowenig wie die Untersuchung des Herzens der Person X etwas über Bau und Eigenschaften des Herzens der Person Y konkret aussagen kann.

Darüber kann man auch in einer Abhandlung oder einer Vorlesung über den allgemeinen Bau des Menschenherzens nichts erfahren. Wenn wir aber nur alle konkreten Eigenschaften der konkreten Gegenstände in unserem Gedächtnis festhielten, so würden wir kaum begreifen können, wie das Herz der Personen X und Y - überhaupt: das menschliche Herz - allgemein arbeitet.

Eine elektronische Schildkröte und eine lebende Schildkröte sind in vielem verschieden, mehr noch: sie haben nicht ein einziges Organ gemeinsam. Wenn uns die elektronische Schildkröte dennoch beim Studium der lebenden Schildkröte helfen kann, so beruht das darauf, dass sie bestimmte Automatismen zu realisieren vermag, die auch der lebenden Schildkröte eigen sind. Und umgekehrt, wenn wir alle wesentlichen Eigenschaften der Gehirntätigkeit, des Denkens, vollständig kennen, so wird ein elektrisches oder mechanisches Modell, das diese Eigenschaften realisiert, unbedingt ebenso denken wie das Original, obgleich es aus einem gänzlich anderen Material besteht.

Manchmal wird gefordert, dass sich die Ergebnisse der Kybernetik unmittelbar in der Produktion durch die Entwicklung mehr oder weniger nutzbringender automatischer Maschinen für Industrie, Transport und Landwirtschaft niederschlagen hätten; es wird von einer "Anwendung" der Kybernetik in der Technik gesprochen.

Es ist jedoch nicht die Aufgabe der Kybernetik, spezielle Automaten oder Steuerungssysteme zu entwickeln, sondern deren allgemeine Theorie zu erforschen. Ihre Gesetze gelten allgemein, auch für allereinfachste Automatenysteme, z.B. für eine Mausefalle.

Kann man von irgendeiner Naturerscheinung sagen, dass für sie die Physik nicht gilt? Ebenso ist die Kybernetik eine "Physik der Automaten", gleich welcher Art sie auch sein mögen - einfach oder kompliziert, nützlich oder nutzlos und vielleicht sogar schädlich.

Deshalb hat das kybernetische Experiment (z.B. das Komponieren von Musikstücken mittels eines Rechenautomaten) nur das eine Ziel: die Hypothesen über das Wesen des untersuchten Prozesses (also z.B. des Komponierens) zu überprüfen.

Die Forschungen auf dem Gebiet der Kybernetik werden dazu führen, dass Maschinen entstehen, die von großem Nutzen sind - es gibt sie im übrigen schon jetzt in stattlicher Anzahl. Die Konstruktion dieser Maschinen jedoch ist Sache der Praxis, der industriellen und technischen Automatisierung.

Die Fakten, welche die Kybernetik für ihre Arbeit, für die Analyse von Automatismen, benötigt, entnimmt sie den verschiedenartigsten, oftmals höchst komplizierten Vorgängen und Erscheinungen, wie z.B. der Entstehung und Entwicklung des Lebens, dem Verhalten der Lebewesen in ihrem Milieu, auch dem Verhalten des Menschen einschließlich seiner Sprache, seiner Wissenschaften und Künste - natürlich auch dem Verhalten automatischer Maschinen bis zu den allerkompliziertesten Systemen.

Aus den gewonnenen Fakten und Daten zieht die Kybernetik abstrakte Schlussfolgerungen, die

---

<sup>3</sup>W.R. Ashby; An Introduction to Cybernetics. London 1956 (Eine Einführung in die Kybernetik.)

sich dann nicht speziell auf einen konkreten Gegenstand beziehen, sondern auf jeden beliebigen der gegebenen Art angewendet werden können.

Diese abstrakten Schlussfolgerungen muten auf den ersten Blick schwierig an; in unserem Buch werden sie deshalb nicht trocken dargelegt, sondern durch konkrete Beispiele und Anwendungsgebiete erläutert. Der Leser wird also auch manches über Mathematik, Philosophie, Biologie, Physiologie des Nervensystems, Psychologie, Sprachwissenschaft, Theorie der automatischen Steuerung und Regelung sowie der automatischen Maschinen und über weitere Wissensgebiete finden.

Wir wollen uns hier nicht die Aufgabe stellen, alles das bis zur letzten Einzelheit zu behandeln, was in diesen Wissenschaften an Erkenntnissen gesammelt werden ist. Wir wollen uns vielmehr damit beschäftigen, das Gemeinsame der unterschiedlichsten Erscheinungen und Gegenstände, angefangen von den winzigen Keimen des Lebens, die vor Jahrtausenden auf der Erde entstanden sind, bis hin zur Struktur des Gehirns, vom primitiven Türschloss bis zur modernen elektronischen Rechenmaschine, kennenzulernen.

## 2 Die Unwahrscheinlichkeit, ein mathematisches Maß der Mühe und der Kenntnis



Die ursprüngliche Teleologie - Der alte Streit um das Auge: Ist es Ursache oder Mittel? - Teleologie kontra Fortschritt - Von der Dampfmaschine zur statistischen Thermodynamik - Die Entropie und ihr Gegenteil - Ein Dämon erscheint - Dämonenverehrer gestern und heute - Aber der Dämon will auch essen ... - Wir betreiben keinen Dämonenkult, sondern eine Theorie höchst bedeutsamer Maschinen.

Die Notwendigkeit, die Unterschiede zwischen gesteuerten und nicht gesteuerten Vorgängen und Erscheinungen zu analysieren, ergab sich bereits in sehr früher Zeit.

Als die Menschen die Natur zu studieren begannen, erkannten sie, dass alles seine Ursache hat: Bei jeder Erscheinung kann man fragen: Warum? Doch manche Erscheinungen haben eine Ursache und dienen außerdem einem Zweck: Zur Frage "Warum?" kommt noch die Frage "Wozu?".

Der Mensch der Urzeit nahm an, dass in der Welt alles zielgerichtet sei, dass alles den Zweck habe, ihm entweder zu nützen oder zu schaden. Die Sonne existiert, um tagsüber Licht zu spenden, der Mond, um die Nacht zu erhellen; die Gehölze wachsen, blühen und tragen Früchte, um dem Menschen Nahrung zu geben, die Mäuse sind geschaffen, um diese Nahrung anzunagen ...

Der Mensch beobachtete, wie ein hochgeworfener Stein zur Erde fällt, und zog daraus den Schluss, dass der Stein das Bestreben habe, wieder dorthin zu gelangen, wo er früher lag, dass er also zu einem bestimmten Ort gehört. Aus der Tatsache, dass sich ein Stein beim Niederfallen immer schneller bewegt, folgerte der Mensch, dass sich der Stein freut, wieder auf die Erde zu kommen, und sich darum immer mehr beeilt ...

Je größer und komplizierter die Aufgaben wurden, die sich der Mensch gestellt hat, desto mehr wuchs seine Vermutung, dass sich die Natur ihm gegenüber gleichgültig verhalte: Wenn Regen notwendig war, so regnete es nicht immer, dagegen regnete es oft, wenn Regen überflüssig oder gar schädlich war.

Die Sterne, von denen man zunächst annahm, dass sie an der Himmelsphäre befestigt seien und das Schicksal der Menschen bestimmten, erwiesen sich als unermesslich weit entfernte Lichtquellen, unvergleichlich größer als unser Planet. Unter den Objekten unserer Erkenntnis wurden nur sehr wenige gefunden, die Freude oder Kummer kennen, die ein inneres Bestreben zeigen und denen ein Zweck eigen ist.

Heute haben die Menschen längst vergessen, warum man früher an den Dingen etwas Männliches oder etwas Weibliches zu erkennen geglaubt hat, wie das grammatikalisch betrachtet, im Geschlecht der Wörter zum Ausdruck kommt: der Tisch, die Lampe ...

Durch das Fortschreiten der Erkenntnis gelangten die Menschen zu der Überzeugung; dass sie selbst ein gleichberechtigter Teil der Natur sind. Die Welt und alles, was in ihr besteht, ist nicht für die Menschen geschaffen, sie dient auch nicht irgendeinem anderen Zweck oder Ziel, sondern sie besteht ewig, sozusagen für sich selbst.

Die Sonne, der Mond und die Sterne, die Berge und die Flüsse, die Atome und die Moleküle, das ganze unbegrenzte Weltall bewegt und verändert sich nach unumstößlichen Naturgesetzen und nicht entsprechend irgendeinem aufgeprägten Zweck oder Ziel.

Aber dennoch ist es keine Spekulation, in begrenzten Bereichen der Welt Zielstrebigkeit zu vermuten. Die Pflanzen, die Tiere und die Schöpfungen der menschlichen Arbeit sind zweifellos zweckmäßig und zielgerichtet in ihrem Bau und ihrer Funktionsweise.

Zwar ist es sinnlos, zu fragen, wozu die Wolga ins Kaspische Meer fließt, zu welchem Zweck es regnet, wozu die Planeten in elliptischen Bahnen die Sonne umlaufen oder wozu auf der Erde Pflanzen, Tiere und Menschen leben.

Aber wir können sagen, wozu die Linde Blätter und Blüten, der Mensch Zähne und Arme, das Haus Fenster und das Flugzeug Tragflächen hat.

Die antike griechische Wissenschaft hat die Vorstellung begründet, dass es in der Welt zwei Arten von Ursachen gäbe: "Anfangs-" oder "Wirkursachen", die dem Ereignis vorangehen, es hervorrufen, und "End-" oder "Zweckursachen", die zeitlich nach dem Ereignis bestehen und seine Richtung so beeinflussen, dass sich bestimmte feststehende Resultate ergeben.

Zwischen den "Anfangs-" und den "Endursachen" wurde ein Unterschied lediglich darin gesehen, dass die gewöhnlichen Ursachen von der Gegenwart in die Zukunft wirken, während die Endursachen "in der Zukunft existent" sind.

In einem bestimmten Augenblick existiert aber weder das Vergangene noch das Zukünftige, so dass in diesem Sinne das Vergangene und das Zukünftige tatsächlich gleichwertig, symmetrisch sind. Es ist leicht einzusehen, dass frühere Zustände eines beliebigen Systems dessen gegenwärtigen Zustand festlegen können; jedoch zu behaupten, dass dieser Zustand ebenso einfach von einem zukünftigen Zustand her bedingt wird, ist unsinnig. Das widerspräche allen allgemeinen Vorstellungen von der Welt, in der wir leben.

Die antiken Philosophen unterschieden sich in ihren Auffassungen von den "Endursachen" voneinander. Materialisten - Demokrit (etwa 460-360 v.u.Z.), Epikur (341-270 v.u.Z.), Lukrez (97-55 v.u.Z.) - lehrten, dass es keine "Endursachen" in der Natur gibt und auch nicht geben könne, dass sie nur Einbildungen, Selbsttäuschungen des menschlichen Verstandes seien.

Die Welt, so lehrten sie, sei eine Ansammlung unzählig vieler Atome, die sich heute in einer bestimmten Anordnung - unter vielen möglichen - befinden und morgen in eine andere Anordnung übergehen. Uns Menschen erscheint es kraft besonderer Eigenschaften unseres Verstandes, als ob diese Anordnung durch jemanden geschaffen wurde. Lukrez schrieb in seinem Gedicht 'Von der Natur der Dinge':<sup>4</sup>

"Und was übrigens noch auf dergleichen Weise man auslegt,  
Ist im verkehrten Sinn und verdreht ein richtiges Urteil:  
Weil an dem Körper nichts des Gebrauches wegen entstanden,  
Sondern sich aus dem Entstandenen erst desselben Gebrauch ergibt."

Die Augen sind also nach Lukrez nicht dazu vorbestimmt zu sehen, sondern wir sehen, weil wir Augen haben. Das ist ein nur beschränkt richtiger Standpunkt. Denn jede Einzelheit im Bau

---

<sup>4</sup>T. Lucretius Carus: von der Natur der Dinge. Übersetzt von K. L. v. Knebel Verlag Ph. Reclam. Leipzig 1947, Viertes Buch. Vers 821 bis 824.



des Auges ist bereits im Embryo angelegt, obwohl ein Embryo noch nicht sehen kann; bereits in diesem Zustand ist also eine Anpassung des Auges an das künftige Sehen vorhanden.

Außerdem kann niemand bestreiten, dass das Verhalten des Menschen zielstrebig ist - das geht schon aus der Definition des Begriffs "Ziel" hervor. Nimmt man also den genannten Standpunkt ein, muss man anerkennen, dass der menschliche Verstand eine außergewöhnliche, plötzlich erscheinende "Ursache" für seine Zielstrebigkeit aufweist, die allen anderen Dingen fehlt.

Die Idealisten der antiken Welt - Sokrates (469-399 v.u.Z.), Platon (427-347 v.u.Z.) - betrachteten die "Endursache" von einem ganz anderen Standpunkt aus.

Sie behaupteten, dass ein höherer Wille existiere, der die ganze Welt einem Ziel zustreben lässt. Und dieser Wille ist nach ihrer Meinung der Wille Gottes.

Später entwickelte sich aus der Vorstellung, dass die "Endursachen" in der Welt in gleicher Weise wirken wie die "Anfangsursachen", eine besonders reaktionäre Lehre: der Finalismus oder die Teleologie.

Die Teleologie "erklärt" alles Geschehen in der Welt durch phantastische, von "höheren Mächten" gesetzte Ziele. Der französische Schriftsteller des achtzehnten Jahrhunderts Bernardin de Saint-Pierre behauptete mit vollem Ernst, dass z.B. die Hunde verschieden gesprenkelt sind, damit sie der Besitzer nicht verwechseln solle, dass die Melone Rillen hat, damit sie ohne Schwierigkeiten zum Essen zerteilt werden könne, und dass die Flöhe auf weiße Laken springen, damit sie vom Menschen besser gefangen werden können.

Die Teleologie hemmte die Entwicklung der Wissenschaft. Als im Jahre 1780 die ersten Doppelsterne entdeckt wurden, bestritt ein Teleologe mit aller Entschiedenheit ihre Existenz. Er war davon überzeugt, dass die Sterne (die Sonnen anderer Planetensysteme) deshalb vorhanden sind, um ihre Planeten zu erwärmen und auf ihnen Leben zu ermöglichen.

"Wozu soll es Doppelsterne geben?" fragte sich dieser Teleologe. "Sollen denn für die Bewohner der zugehörigen Planeten Tag und Nacht durcheinandergeraten?"

Die Teleologen bekämpften die Lehre des berühmten Astronomen Kopernikus, den Blitzableiter, die Pockenschutzimpfung, die Chirurgie und die revolutionäre Umwälzung der gesellschaftlichen Verhältnisse. Sie standen auf dem Standpunkt: "Lasst die Finger davon; denn ihr wisst nicht, wozu es gut ist!" - "Gott oder der blinde Zufall, ein Drittes ist ausgeschlossen."

Wie ähnlich ist das den Urteilen des dummen, selbstgefälligen "gelehrten Nachbarn" aus einer Humoreske Anton Tschechows, der sagt: "Wozu hat die Sonne Flecken, sie könnte doch ohne sie auskommen?"

Viele gegenwärtig wichtige Wissenschaften hatten unseriöse Vorgängerinnen. Die Chemie entstand z.B. aus der Alchimie, die sich vergeblich bemüht hatte, Gold und "Wunderelixiere" durch Stoffumwandlung zu gewinnen. In den Anfängen der Medizin bediente man sich auch solcher Mittel wie der Geisterbeschwörung.

Die Theorie der Steuerung, die Kybernetik, hat noch weniger von ihrer Vorgängerin, der Teleologie, übernommen, da diese Lehre rein spekulativ ist und nicht einmal einfache Fakten gesammelt hat, wie es z.B. die Astrologen, die Alchimisten und sogar die Quacksalber getan haben.

Die Teleologen sind zwar der Wahrheit nahe gekommen, als sie behaupteten, dass alle Erscheinungen in der Welt der Organismen - vom Aufbau der einfachsten Lebewesen bis zum menschlichen Verstand - gesteuert, auf ein Ziel gerichtet sind. Sie haben aber einen großen Fehler begangen, als sie annahmen, dass dies von außen her (von einem Gott) bewerkstelligt

werde. Sie hielten die automatische Steuerung in der Natur für unmöglich.

Die Physik konnte sich erst entwickeln, nachdem Francis Bacon (1561-1626) jegliche "Zwecke", "Ziele" und "Endursachen" aus der exakten wissenschaftlichen Betrachtungsweise entfernt hatte, soweit sie nicht durch Experimente und zahlenmäßige Daten erfassbar waren.

Später aber musste die Wissenschaft zu der Erkenntnis gelangen, dass Zweckmäßigkeit und Zielstrebigkeit in der Welt einer besonderen prinzipiellen Klärung bedürfen.

Noch vor zweihundert Jahren gehörte es zu den Aufgaben der Naturwissenschaften, die Stoffe zu registrieren, aus denen die Welt besteht, und ihre Eigenschaften zu bestimmen. Die Chemie untersuchte die Eigenschaften der konkreten Stoffe, und die Physik beschäftigte sich mit dem "Stoff" allgemein und mit den verschiedenen Erscheinungsformen seiner Haupteigenschaft, der Bewegung.

Die Technik gab den Stoffen verschiedene Formen und wandelte sie um; dafür wurden vielerlei Instrumente, Maschinen und Apparate ersonnen.

Damals operierten die Physiker auch, mit solchen "Stoffen" und "Substanzen" wie der Wärme, der Elektrizität, dem Licht, dem Magnetismus, die in Wirklichkeit verschiedene Formen der Bewegung der Materie darstellen.

Aber nun lärmten in den Schächten und in den Fabriken metallene, in feuchte Wolken gehüllte Ungeheuer: die ersten Dampfmaschinen. Früher hatten die Ingenieure nur Maschinen gekannt, die eine Bewegung umwandeln (z.B. die Bewegung fließenden Wassers in die Rotation eines Bohrers für Kanonenrohre). Jetzt entstanden Maschinen, die Bewegung erzeugten. Woher stammte diese Bewegung? Aus der Wärme? Die Wärme aber wurde als ein unwägbarer Stoff angesehen. Wie kann aus einem Stoff eine Eigenschaft eines anderen entstehen?

Die Dampfmaschinen, die von den Ingenieuren und Technikern geschaffen wurden, waren bis zur letzten Schraube bekannt. Nichtsdestoweniger blieb der Wissenschaft zunächst verborgen, was die Dampfmaschinen zu leisten vermögen, wieweit sie verbessert werden können und welche Prinzipien ihrer Funktion zugrunde liegen.

Im Jahre 1824 schuf der junge Offizier Sadi Carnot (1796-1832) in seiner Schrift Gedanken über die bewegende Kraft des Feuers und über Maschinen, die diese Kraft ausnutzen die Grundlage für die wissenschaftliche Untersuchung der Prozesse, bei denen "Kräfte" umgewandelt werden. In den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde der allgemeine Begriff Energie geprägt, und die Wärme, die Elektrizität, die chemische Affinität, der Magnetismus wurden als Energieformen erkannt, die untereinander umgewandelt werden können, ohne dass etwas an Energie insgesamt verlorengeht oder aus dem Nichts gewonnen wird.

Der Arzt und Naturforscher Robert Mayer (1814-1878) und die Physiker James Prescott Joule (1818-1889) und Hermann von Helmholtz (1821-1894) formulierten das Gesetz von der Erhaltung und Umwandlung der Energie, das für jede Bewegung der Materie in der Welt gilt. Dieses Gesetz wurde zum festen Fundament der Technik, die die Naturkräfte dem Menschen nutzbar macht. Die umfassende Lehre von der Energieumwandlung bildet die Grundlage der Physik, speziell eines ihrer wichtigsten Teilgebiete, der Thermodynamik, der theoretischen Basis der Wärmetechnik.

Doch bereits die Forschungen Carnots zeigten, dass es nicht möglich ist, die Thermodynamik allein durch ein einziges Gesetz, das Gesetz von der Erhaltung der Energie, zu begründen. Wenn eine Dampfmaschine arbeiten soll, dann ist nicht nur ein erhitztes Medium - der Dampf - notwendig, sondern auch ein Kühler, in dem der Dampf kondensiert.

Aus dieser Tatsache haben vier bedeutende Physiker - Rudolf Clausius (1822 bis 1888), William Thomson (1824-1907), Ludwig Boltzmann (1844-1906) und Williard Gibbs (1839-1903) - ein weiteres Gesetz, den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, abgeleitet.



Bild 2.1.: Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann (1844 bis 1906) fasste die allgemeinsten statistischen Prinzipien der Physik in einer abstrakten Theorie der Wärmekraftmaschinen zusammen.

Danach ist die unaufhörliche Energieumwandlung in der Natur mit nichtumkehrbaren qualitativen Veränderungen der Energie verbunden - die Energie wird "entwertet", sie büßt an ihrer Fähigkeit ein, Arbeit zu verrichten. Das Maß für diese qualitative Veränderung der Energie wurde im Jahre 1865 von Clausius als Entropie bezeichnet.

Der Begriff der Entropie ist, um mit einem Wort des Mathematikers A. Poincaré zu sprechen, "ungeheuer abstrakt"; über ihre Eigenschaften herrscht auch heute noch keine einheitliche Auffassung.

Manchmal wird gesagt, dass die "thermodynamische Entropie ein Maß für den Mangel an Informationen über ein bestimmtes physikalisches System"<sup>5</sup> sei und folglich nicht durch den tatsächlichen Zustand des Systems selbst bedingt wird, sondern durch gewisse Vorstellungen über das System, durch Ableitungen aus diesem.

Indessen ist jedem unvoreingenommenen Menschen klar, dass ein Wärmeübergang von einem wärmeren zu einem kälteren Körper auch dann stattfindet, wenn kein Forscher dabei ist, z.B. in den Weiten des Weltraums. Auch dort wird genauso wie in unseren Laboratorien die Energie "entwertet", und die Entropie nimmt zu.

Im Jahre 1877 konnte Ludwig Boltzmann beweisen, dass die Zunahme der Entropie in einem System gleichbedeutend mit dem Übergang dieses Systems von einem geordneten, weniger Wahrscheinlichen Zustand in einen ungeordneten Zustand größerer Wahrscheinlichkeit ist.

Eine Inschrift auf einem Stein des Bürgersteigs wird beispielsweise mit der Zeit blasser, ihre Farbe wird durch die Schritte der Passanten auf die Steine der Umgebung verteilt. Eine entsprechende Beobachtung kann man machen, wenn zwei Gefäße, in denen sich Gase befinden, durch eine Röhre verbunden werden. Die Gase vermischen sich nämlich wegen der ungeordneten Bewegung ihrer Moleküle zu einem homogenen Gasgemisch.

Schon wegen der Erfordernisse der praktischen Thermodynamik beschäftigt sich die Physik mit der Wahrscheinlichkeit der verschiedenen möglichen Zustände physikalischer Systeme, mit einem Problem also, das den wesentlichen Inhalt des alten Streites um die "Endursache", die "Zielstrebigkeit" und die "Zweckmäßigkeit" bildet.

Wären in der Welt alle Übergänge aus einem Zustand in einen anderen gleich wahrscheinlich, so entwickelte sich das Auge des Embryos sozusagen durch einen normalen Ordnungsprozess. Stellt es aber einen weniger wahrscheinlichen, hochgeordneten Zustand dar, so widerspricht seine Entwicklung aus weniger geordnetem Stoff dem Gesetz von der Zunahme der Entropie.

Gibt es nun eine völlig objektive, von Gefühl und Meinung freie Möglichkeit, eine Anhäufung von Teilchen als geordnet oder als ungeordnet zu bezeichnen?

<sup>5</sup>L. Brillouin: Science und Information Theory, New York 1956 (Wissenschaft und Informationstheorie).

Ein Schriftsteller wird sicher eine andere Auffassung von Ordnung und Unordnung auf seinem Schreibtisch haben als seine Familie. Die vielen Zettel, Konspekte und Bücher mit Randbemerkungen, die er nach einem "wohldurchdachten" Plan auf der Schreibtischplatte ausgebreitet hat, werden einem Uneingeweihten als entsetzliches Chaos erscheinen.

Andererseits würde ein Schreibtisch, auf dem alles schön gleichmäßig gestapelt ist, dem Schriftsteller bei seiner Arbeit, beim Suchen bestimmter Aufzeichnungen, große Schwierigkeiten bereiten.

Uns hilft, wie wir sehen, nur ein strengerer Begriff als die landläufige Vorstellung von der "Ordnung" weiter: der Begriff der Isotropie.

Wir nennen ein System isotrop, wenn seine Eigenschaften nach allen Richtungen hin gleich sind.

Wenn eine Hausfrau einen Teig anrühren will, so sind Mehl, Milch, Zucker und die anderen Zutaten zunächst ungleichmäßig in der Mischung verteilt. Das System ist, wie man sagt, anisotrop. Wird der Teig gut durchgeknetet, so entsteht ein isotropes Gemisch. Eine Stadt ist ein anisotropes Gebilde, denn in Richtung einer Straße stößt man nicht auf Häuser, weicht man von dieser Richtung ab, so trifft man auf Häuser, die diese Straße flankieren; isotrop aber war die ungeordnete, planlose Ansammlung von Hütten im Dorf Nachalowka vor der Oktoberrevolution.

Auf manchen Karten findet man Windrosen, die nicht nur die Himmelsrichtungen angeben, sondern auch darüber Auskunft geben, wie häufig der Wind am betreffenden Ort aus dieser und jener Richtung weht. Es handelt sich dabei um ein Bündel von Strahlen, die von einem Punkt aus nach den verschiedenen Richtungen weisen.

Auf jedem Strahl ist vom Zentrum aus eine Strecke abgetragen, deren Länge ein Maß für die Häufigkeit der betreffenden Windrichtung ist.

Der Linienzug, der die Endpunkte der genannten Strecken verbindet, hat die Form eines unregelmäßigen Sterns, einer "Rose". Er zeigt anschaulich die Anisotropie des Windes am betreffenden Ort.

Auf gleiche Weise kann man eine "Rose der Bebauung" einer Stadt oder eine "Rose des Salzgehalts" eines Teiges oder Darstellungen der Anisotropie anderer Systeme entwerfen.

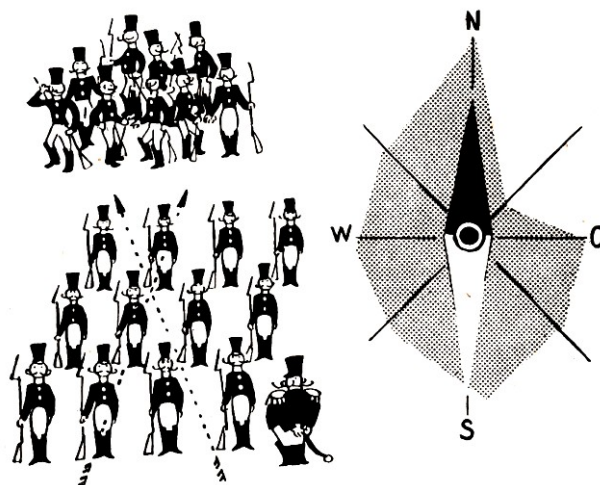


Bild 2.2.: Soldaten, die in Reih und Glied stehen, bilden ein anisotropes System. Zur graphischen Darstellung der Anisotropie kann eine Figur dienen, die der Windrose ähnelt.

Soweit die Eigenschaft, deren Verteilung untersucht wird, quantitativ erfasst werden kann

und unabhängig von persönlichen Meinungen ist, erweist sich auch deren Verteilung selbst als objektives Kennzeichen dieses Systems. Raum und Zeit werden von der Physik als isotrop angesehen.

Die Isotropie eines Systems ist veränderlich. Manchmal wird sie durch die Einwirkung äußerer Kräfte zerstört und dank der Eigenschaften des Systems wiederhergestellt, manchmal zeigt auch umgekehrt das System eine Tendenz zur Anisotropie, und dieser Tendenz wirken äußere Kräfte entgegen.

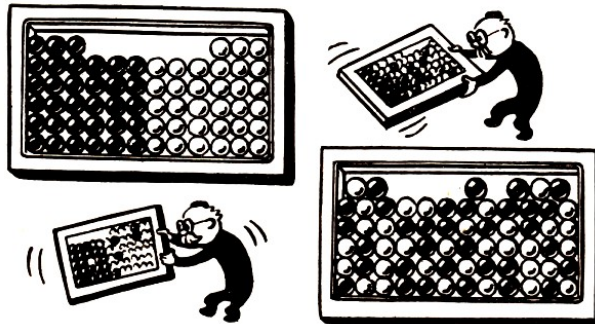


Bild 2.3.: Die Entropie eines einfachen Systems - weiße und schwarze Kugeln in einer Kiste - nimmt durch Erschütterungen zu.

Wir legen schwarze und weiße Kugeln geordnet in eine Kiste: die schwarzen links, die weißen rechts. Das System ist anisotrop in Bezug auf die Farbe der Kugeln. Nun schütteln wir die Kiste, die Kugeln wechseln ihre Plätze, das System wird isotrop.

In diesem Beispiel hat die ursprüngliche Anordnung der Kugeln nach der Farbe eine geringe Wahrscheinlichkeit, das Durcheinander der Kugeln dagegen eine große: die Entropie des Systems vergrößert sich durch das Schütteln.

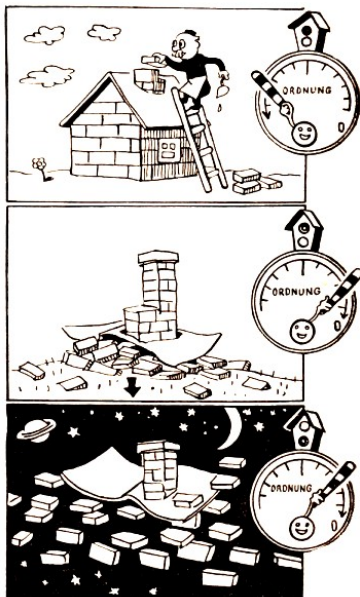


Bild 2.4: Zweckmäßige physikalische Systeme, z.B. ein Wohnhaus, das von Menschen gebaut wird, zeichnen sich durch eine hohe Ordnung aus. Bei ihrem Entstehen verringert sich die Entropie. Nach Jahren wird das Haus durch äußere, nicht zielgerichtete Einwirkungen zerstört und in einen Ziegelhaufen verwandelt. Ein solcher Prozess kann auch im Bereich der Schwerelosigkeit vor sich gehen.

Ein Teig, der von einer leichtfertigen Hausfrau längere Zeit stehengelassen wird, entmischt sich wieder: die schweren Teilchen des angefeuchteten Mehls sinken zu Boden, das Fett steigt nach oben. Der isotrope Zustand dieses Systems ist wenig wahrscheinlich; sich selbst überlassen, geht das System in einen wahrscheinlicheren, anisotropen Zustand über.

Der Begriff der Wahrscheinlichkeit des Zustandes eines Systems und der Begriff der Entropie eines Systems ist auf beliebige Systeme anwendbar, die aus einer großen Zahl von Einzelobjekten bestehen. Je mehr Objekte vorhanden sind, desto genauer sind diese Begriffe bestimmt. Es wäre sinnlos, die Isotropie einer Kombination von zwei oder drei Punkten ermitteln zu wollen, da sich das Ergebnis allein durch die Art und Weise, wie gemessen wird, verändern könnte.

Bei der Festlegung des sehr allgemeinen und wichtigen Entropiebegriffs waren die Physiker um eine saubere, exakte Definition bemüht. Max v. Lauer hat warnend gesagt:

"Während aber die Energie eines nach außen völlig abgeschlossenen Systems unverändert bleibt, nimmt seine Entropie, additiv zusammengesetzt aus den Entropien seiner Teile, bei jeder Veränderung zu. Der ideale und für die Theorie so wichtige Grenzfall, dass sie unverändert bleibt, ist in Strenge nie zu verwirklichen. Abnahme der Entropie aber ist auch für den Gedankenversuch naturgesetzlich verboten."<sup>6</sup>

"... auch für den Gedankenversuch" gilt also dieses strenge Verbot. Der Physiker führt seine Gedankenversuche kühn mit Massen, die in einem Punkt konzentriert sind, mit dem gekrümmten Raum und mit Teilchen aus, die gleichzeitig Wellen sind. Doch er darf sich keine Systeme mit abnehmbarer Entropie vorstellen.

Das würde nämlich bedeuten, dass er die Welt sich rückwärts entwickelnd und die Zeit rückwärts laufend auffasst.

Im übrigen kann man mit eigenen Augen sehen, wie es wäre, wenn die Zeit in umgekehrter Richtung ablief. Es braucht nur ein Vorführer einen Film rückwärts durch den Projektor laufen zu lassen. Auf der Leinwand ist dann eine sonderbare Handlung zu sehen.

Der Held, der von einem Felshang hinab ins Meer gestürzt wurde, entsteigt nun den Wellen und fliegt direkt dem Mörder in die Arme, der entfesselt ihn und beide trennen sich munter und mit freundlichen Gesten ... Aus einem Flammenmeer wachsen hölzerne Balken heraus, die sich zu einem Haus zusammensetzen, das Flammen und Rauch in sich verschlingt und immer vollkommener wird ...

Eine Wärmekraftmaschine arbeitet, weil das System - der Dampf, der Arbeit verrichtet - bezüglich der Geschwindigkeit der Moleküle anisotrop ist. Die höhere Temperatur im Kessel ist lediglich ein anderer Ausdruck für den Umstand, dass die Dampfmoleküle im Kessel eine größere Geschwindigkeit haben.

Im Kühler (Kondensator) herrscht eine niedrigere Temperatur, dort haben die Moleküle eine geringere Geschwindigkeit. Verbinden wir den Kessel mit dem Kühler, so erhalten wir ein System, bei dem die Geschwindigkeit der Moleküle anisotrop verteilt ist. Das System strebt zur Isotropie, und bei diesem Vorgang kann Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt werden.

Unterlässt man es, den Kessel zu heizen und den Kühler zu kühlen, so wird in diesem Prozess ein Punkt erreicht, bei dem die Geschwindigkeit der Moleküle im Kessel und im Kühler isotrop verteilt ist. Dann hat das System einen Zustand angenommen, in dem keinerlei qualitative Veränderungen möglich sind, und die Entropie des Systems hat ein Maximum erreicht.

In diesem harmonisch zusammengefügt Bild gibt es allerdings eine unklare Stelle, auf die im Jahre 1871 James Clark Maxwell in seiner Arbeit 'Theorie der Wärme' hingewiesen hat.

In einem Gedankenversuch ließ Maxwell den Einfluss eines schrulligen Dämons zu, eines "Wesens, dessen Sinne so fein sind, dass es jedes Molekül eines gegebenen Systems auf seinem Weg verfolgen kann und an dem Zustand des Systems etwas verändern kann, was gegenwärtig für uns unmöglich ist".

---

<sup>6</sup>Max von Laue: Geschichte der Physik. Universitätsverlag. Bonn 1946, Seite 106.

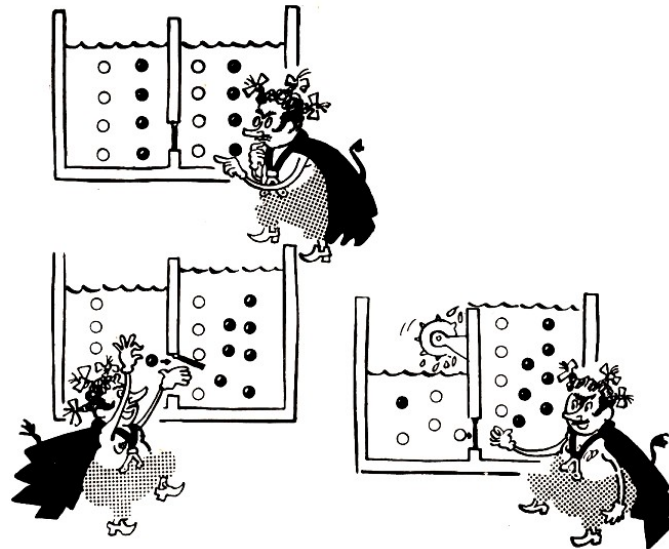


Bild 2.5.: Der Maxwell'sche Dämon beschleunigt oder bremst die Moleküle nicht. Er öffnet und verschließt nur zeitweise die Öffnung zwischen den Gefäßteilen. Das genügt, um ein Perpetuum mobile (2. Art) zu schaffen.

Maxwell schrieb:

"Wir nehmen ein Gefäß an, das durch eine Scheidewand, in der sich ein kleines Loch befindet, in die Teile A und B getrennt ist. Das Wesen, das die einzelnen Moleküle sehen kann, reguliert den Durchlass in der Scheidewand, und zwar so, dass nur die schnellen Moleküle von A nach B und nur die langsamen Moleküle von B nach A gelangen können. Dieses Wesen bewirkt somit, dass sich ohne Arbeitsaufwand, entgegen dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, die Temperatur in B erhöht und in A erniedrigt!"

Der Leser könnte fragen, wie man sich den Dämon im Gedankenversuch Maxwells vorzustellen hat (der Illustrator hat ihn mit Hörnern, einem Schwanz und anderen mystischen Merkmalen versehen). Da es aber keine Dämonen gibt und auch nicht geben kann und da die Moleküle zudem noch unsichtbar sind, so könnte der Leser folgern, dass das Ganze ein Scheinproblem ist.

Natürlich ist der "Dämon" nur eine Buchillustration - aber was hindert uns daran, ihn durch eine automatische Vorrichtung zu ersetzen? Da uns nicht die Konstruktion einer solchen Einrichtung interessiert, sondern nur ihre Arbeitsweise unter den gegebenen Bedingungen, wollen wir uns mit ihrer Konstruktion nicht weiter beschäftigen, d.h., wir betrachten einen schwarzen Kasten, der die Tätigkeit des Maxwell'schen Dämons ausführt.

Der Kampf mit dem hinterlistigen Dämon Maxwells wurde sehr erbittert geführt, sein Widerhall ist bis in unsere Zeit zu vernehmen. Vor einigen Jahren entwickelte eine Gruppe Moskauer Physiker unter der Leitung von Professor P. Oschtschepkow den Gedanken einer Konzentration der Energie, die sich gleichzeitig mit der Auflösung der Energie, die sich aus dem Gesetz von der Zunahme der Entropie ergibt, vollziehen soll.

Gestützt auf unsichere und unrichtig ausgelegte Resultate des Moskauer Betriebs "Santechnika" bei Versuchen mit einem auf Halbleiterbasis arbeitenden elektrischen Kühler, hat diese Gruppe die Möglichkeit verkündet, Maschinen zu bauen, die "zerstreute" Wärme in Arbeit verwandeln, also ein "Perpetuum mobile zweiter Art" zu schaffen. Es ist bereits früher festgestellt worden, dass der Menschheit eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung stünde, falls eine solche Maschine möglich wäre.

Beispielsweise würde, wenn die gesamte Technik der Welt allein auf Wärmeenergie dieses Ursprungs angewiesen wäre, sich die Temperatur der Ozeane in 1700 Jahren nur um ein Hundertstelgrad vermindern.

Aber schon im Jahre 1912 hat der Physiker M. von Smoluchowski gezeigt, dass es den Vorstellungen von Isotropie und Anisotropie eines Systems widerspricht, wenn man den Zustand einzelner Moleküle betrachtet und Moleküle auf Grund ihres Zustandes auswählt, weil diese Vorstellungen nur für das ganze System, für die Untersuchung einer großen Anzahl von Molekülen sinnvoll sind.

Wenn wir die Moleküle des Systems einzeln betrachten, so ist keine Tendenz zur Änderung ihrer Verteilung im System zu erkennen. Daher würde sich unser Dämon, anschaulich ausgedrückt, so ungeschickt verhalten, dass er den Prozess mit dem gleichen Erfolg sowohl in Richtung auf eine Vergrößerung als auch in Richtung auf eine Verminderung der Entropie steuern würde.

Als die amerikanischen Physiker Szillard und Gabor versuchten, den schwarzen Kasten zu erforschen, also einen künstlichen Dämon zu projektieren und zu berechnen, stellten sie fest, dass eine solche Maschine zwar arbeiten würde, jedoch zu ihrem Betrieb Energiezufuhr notwendig ist. Der Energieaufwand für die Arbeit einer solchen Maschine ist größer als der Energiegewinn, der sich aus ihrer Tätigkeit ergibt.

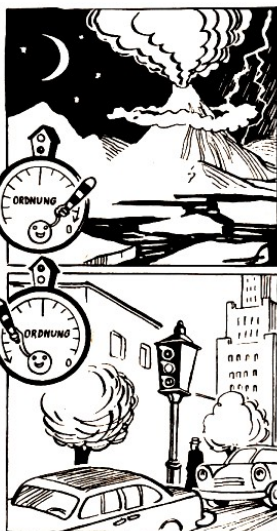


Bild 2.6.: In der unbelebten Natur erhöht sich die Entropie der Systeme letztlich bei jeder Veränderung. In der Welt der Lebewesen und der Welt der Technik, die von den Menschen geschaffen wurde, wächst die Ordnung an, und die Entropie verringert sich.

Wir wollen uns wieder dem seit langem bekannten Umstand zuwenden, dass uns im Verhalten der Tiere, in ihrem Bau und in der Funktion ihres Organismus, im menschlichen Verstand und seinen vielfältigen Schöpfungen ständig eine Abkehr von den gewöhnlichen statistischen Gesetzen der Natur vor Augen ist.

Wenn sich die Atome der Materie zufällig zu den verschiedensten Kombinationen vereinigen, so können sie sich dabei allein auf Grund ihrer unaufhörlichen Bewegung, also ohne weitere Ursachen, zur Gestalt eines menschlichen Körpers und eines Gehirns zusammenfinden.

Aber die Wahrscheinlichkeit eines solchen Zusammenfindens ist verschwindend klein, praktisch gleich Null. Dennoch ist sie nicht vollkommen gleich Null! Vor kurzem hat der Biologe Lecomte de Nouc errechnet, dass die Wahrscheinlichkeit für das zufällige Entstehen eines einzigen Eiweißmoleküls so gering ist, dass es unter den gegenwärtigen irdischen Bedingungen im Durchschnitt einmal in  $10^{321}$  Jahren vorkommt. Selbst Astronomen erschauern vor einer derart großen Zahl!

Nichtsdestoweniger existieren unter den gegenwärtigen irdischen Bedingungen Milliarden solcher "unwahrscheinlichen" Kombinationen. Täglich begegnen wir ihnen, begrüßen sie, sprechen mit ihnen, ohne darüber zu grübeln, dass sie (und wir selbst) - in kosmischen Maßstäben - außerordentliche Seltenheiten sind. Das gleiche kann man von Städten, Brücken, Maschinen, den Werken von Wissenschaft, Kunst und Literatur sagen. In der Natur kommen die Moleküle des schweren Wassers unter den Molekülen des gewöhnlichen Wassers ungefähr im Verhältnis 1 : 6000 vor, in manchen Atomreaktoren bilden sie in konzentrierter Form den Moderator<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Der Moderator umgibt die einzelnen Kernbrennstoffelemente des Reaktors und dient der Abbremsung der



"Alle Produkte der menschlichen Industrie", schrieb der Mathematiker E. Borel, "von den kilometerlangen Eisenbahnschienen bis zu den Bibliotheken, die mit Büchern angefüllt sind, in denen die scheinbare Unordnung der Buchstaben in Wirklichkeit eine höhere Ordnung darstellt, sind von verschwindend kleiner Wahrscheinlichkeit".<sup>8</sup>

Der Naturforscher F. Auerbach war der Meinung, dass bei allen Lebenserscheinungen eine Entwicklung der Natur festzustellen ist, die entgegengesetzt zur Entropiezunahme verläuft. Er nannte diese Erscheinung Ektropie. Er meinte, dass sich diese Entwicklung ständig ausweitet und eines Tages die Entropie der Welt insgesamt verringert.

Auerbach glaubte, dass er eine Konzentration der Energie in der Natur entdeckt hätte.

Im neunzehnten Jahrhundert wurde mehrfach nach Energieformen gesucht, die für die hochorganisierte Materie spezifisch sind. Wie früher mystische, unwägbare Stoffe vom Charakter des "Phlogistons" angenommen wurden, so wurden nunmehr besondere Kräfte, etwa die "Lebenskraft", oder besondere Energieformen, etwa die "Nervenenergie", ausgedacht.

Das entsprach einer Auffassung, nach der die ganze Welt mit Hilfe von zwei grundlegenden Begriffen beschrieben werden kann: durch Energie und Substanz, "Kraft und Stoff". Alles, was nicht Stoff ist, sei Energie, die, nach Meinung Ludwig Büchners, "entweder in Form von mechanischer oder in Form von elektrischer oder geistiger Kraft" auftritt.

Doch alle Versuche der Forschung, auf experimentellem Wege eine "Lebenskraft" oder "Nervenenergie" zu entdecken und ein Wärmeäquivalent dieser "Energieform" zu ermitteln, blieben völlig ergebnislos. Mehr noch: es wurde mit Sicherheit festgestellt, dass alle Systeme mit "verkehrter" Entropieänderung Energie benötigen, die ihnen in Form von hochwertiger Lichtenergie, Elektrizität oder chemischer Energie zugeführt werden muss, und die sie, in Wärme umgewandelt, wieder an die Umgebung abgeben.

Keine Maschine, kein Organismus kann eine "ektropische" Tätigkeit ohne Energiezufuhr verrichten; stets wird sich dabei die Entropie der Umgebung erhöhen, und ein beträchtlicher Teil ihres Energievorrats wird entwertet.

Die "Ektropie" Auerbachs und auch alle ähnlichen Begriffe, die zu verschiedenen Zeiten auftraten - die "Entelechie" bei Aristoteles und den Teleologen, die "Dominante", die "Kraft zweiter Ordnung", die "Aristogenese" und auch einfach: die "Seele" - blieben solange leere und nutzlose Wörter, bis ihr Wesen in der Form überprüft war, wie es bei den Energieformen geschehen ist: durch Gewinnung mittels einer Maschine.

In der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts entstanden in den Laboratorien Maschinen, die große helle Säle erfüllen, mit elektrischer Energie gespeist werden und der Wartung und Kontrolle durch eine ganze Schar von Menschen bedürfen. Aber diese Maschinen produzieren weder stoffliche Produkte noch Energie. Zunächst wurden sie nur für Zahlenrechnungen benutzt. Später halfen sie den Menschen bei der Lösung wissenschaftlicher Probleme, bei der Wirtschaftsplanung.

Sie wurden auch zur Übersetzung aus einer Sprache in eine andere herangezogen, man ließ sie Gedichte und Musikstücke anfertigen. Sie sagten das Wetter und die Eigenschaft von Kristallen voraus, entzifferten Geheimschriften, lenkten Eisenbahnzüge und Flugzeuge, regelten den Flug kosmischer Raketen, und - sie erwarben die Fähigkeit zu lernen.

Das sind die elektronischen Rechenmaschinen mit automatischer Steuerung.

---

bei der Kernspaltung entstehenden "schnellen" Neutronen auf eine Geschwindigkeit, bei der diese in der Lage sind, weitere Atome des Brennstoffs (z.B. Uran 235) zu spalten.

<sup>8</sup>E. Borel: Der Zufall.

Was wird in diesen Maschinen verarbeitet, was produzieren sie? Sie produzieren Kenntnisse.

Aber wozu brauchen wir Kenntnisse? Wir brauchen sie, um uns Ziele stellen und die Wege zu ihnen finden zu können. Diese Produktion, die seltsamste, die von Maschinen je hervorgebracht wurde, ist also eng mit der Zweckmäßigkeit und Zielstrebigkeit, mit den "Endursachen" und mit der Unwahrscheinlichkeit des Zustandes verschiedener materieller Systeme verbunden.<sup>9</sup>

Es gab in der Tat Schriftsteller, denen die neuen Maschinen keinerlei Anlass zu weiterführenden theoretischen Überlegungen waren. Da in den Maschinen Elektrizität wirkt und die Elektrizität den Gesetzen der Elektrodynamik folgt, meinten diese Schriftsteller (die wohl keine klaren Vorstellungen von diesen Gesetzen hatten), dass die Tätigkeit der Maschinen samt und sonders "den Gesetzen der Elektrodynamik" untergeordnet sei.

Letzten Endes sind nach ihrer Meinung die Maschinen "nur Automaten", Vorrichtungen, die nach einem Programm arbeiten, das ihnen vom Konstrukteur oder Operateur eingegeben wird. Sie können nicht mehr hergeben, als in sie hineingelegt wurde.

Wozu sollte das aber gut sein? Für die Unterhaltung des Publikums?

Wenn wir in die Maschine unsere eigenen Kenntnisse eingeben und von der Maschine dann nicht mehr herausbekommen als eben diese Kenntnisse (ohne Zinsen), so erhebt sich doch offenbar die Frage, weshalb man dann so eine Maschine gebaut hat. Wenn eine Maschine die eingegebenen Kenntnisse umwandelt, nach welcher Stufe der Umwandlung haben wir es dann mit "neuen" Kenntnissen zu tun? Und wenn neue Kenntnisse es ermöglichen, ein menschliches Gehirn zu schaffen; weshalb soll sich dann nicht die Funktionsweise untersuchen und auf die Maschine übertragen lassen? Wo liegen die Grenzen der Vervollkommnung einer "denkenden" Maschine?

Diese Fragen sind denen ähnlich, über die sich Carnot den Kopf zerbrochen hatte, als er die Grundzüge künftiger Wärmekraftmaschinen auszuarbeiten versuchte. Nur beziehen sich diese Fragen hier nicht auf Energie, sondern auf Kenntnisse, nicht auf Dampfmaschinen, sondern auf "denkende" Maschinen.

Eine unbegründet pessimistische Antwort auf diese Fragen würde den Fortschritt der Automatisierungstechnik bedenklich hemmen; eine überschwänglich hoffnungsvolle Antwort dagegen könnte zu nutzloser Vergeudung von Kraft, Material und Zeit bei der Jagd nach einem Phantom führen.

Deshalb haben sich zur Lösung dieser Probleme Mathematiker, die exakte Methoden zur Erfassung und Beschreibung der auftretenden Phänomene beherrschen, und Ingenieure, die fähig sind, Modelle für die aufgefundenen Gesetzmäßigkeiten zu schaffen, zusammengefunden.

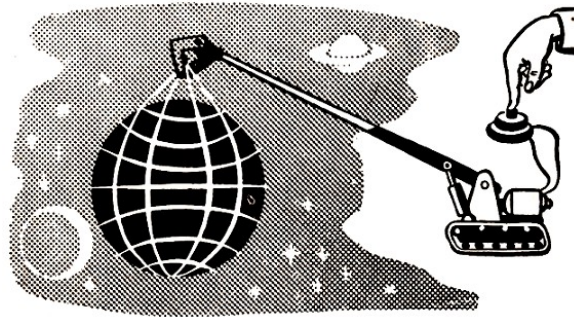
Die mathematische Analyse und das Experiment - die gleichen Methoden, die Bacon in die Physik eingeführt hatte, um die "Endursachen" zu eliminieren - werden jetzt in einem Bereich angewandt, in dem die "Endursachen", diese zweifelhaften Hilfsvorstellungen von Aristoteles, selbst (jedenfalls - auf den ersten Blick) die Richtung und das Wesen der Erscheinungen bestimmen.

Daraus entstand die Kybernetik - eine Wissenschaft, die in vielem auf der Physik beruht, die sich aber gleichzeitig grundsätzlich von der Physik unterscheidet.

---

<sup>9</sup>Wenn wir z.B. wissen, dass ein bestimmter (erwünschter) Zustand eines materiellen Systems möglich ist und Kenntnis von der Wahrscheinlichkeit dieses Zustandes sowie der Entropie des Systems in diesem Zustand haben, dann können wir berechnen, wieviel (hochwertige) Energie wir benötigen, um diesen Zustand herzustellen. Diese Energiemenge (die aufzuwendende "Mühe") ist um so größer, je unwahrscheinlicher der angestrebte Zustand, je kleiner also die Entropie des Systems in diesem Zustand ist.

### 3 Die Steuerung, die Anatomie der Mausefalle und des interplanetaren Roboters



Der Stein und das Flugzeug - ihre Ähnlichkeiten und Unterschiede - Die Unterschiede — charakterisiert durch Wahrscheinlichkeiten - Die Gesetze der Massenerscheinungen als Übergang von Quantität in Qualität - Allgemeine Anatomie der Automaten - Das Signal - das Atom der Steuerung - Das Tier und die Falle ähneln einander ... - Bescheidene Spielsachen und phantastische Schildkröten: sind das schon Roboter?

Es fällt ein Stein ...

Wenn wir mit den Gesetzen der Mechanik vertraut sind, so bleibt uns das künftige Verhalten des Steines nicht verborgen: Wir wissen, dass er zum Erdmittelpunkt hin mit gleichmäßig anwachsender Geschwindigkeit fällt, und können den Zeitpunkt und den Ort des Auftreffens auf die Erdoberfläche mit beliebiger Genauigkeit errechnen.

Es fliegt ein Flugzeug ...

Auch das Flugzeug ist ein physikalischer Körper und kann unter bestimmten - wenn auch unerwünschten - Bedingungen ebenso zur Erde fallen wie ein Stein, dem gleichen Beschleunigungsgesetz folgend. Unter anderen, normalen Bedingungen fliegt es nach einem bestimmten Plan.

Sind Luftwiderstand und Flugzeugform bekannt, so kann man die Bewegung des Flugzeuges ebenso genau voraussagen wie das Fallen eines Steines. Das Flugzeug hat ein Propeller- oder Rückstoßtriebwerk; die Ursache seiner Bewegung befindet sich also im Flugzeug selbst. Das kompliziert die Analyse seines künftigen Verhaltens im Vergleich mit dem eines Steins; dennoch kann auch dieses Problem allein mit den Mitteln der Mechanik gelöst werden.

Die Ergebnisse einer solchen Analyse geben allerdings wenig Anlass zu Optimismus:

Es stellt sich heraus, dass das Flugzeug abstürzen wird, wenn nicht sofort, so nach einigen Minuten oder spätestens nach etwa einer Stunde. Es ist sehr wenig wahrscheinlich, dass es seinen Flug länger fortsetzt, weil "Luftlöcher", Windstöße und Unregelmäßigkeiten in der Bewegung der Motoren seine Stabilität in der Luft fortwährend stören.

Weshalb stürzt das Flugzeug in Wirklichkeit aber nicht ab? Weil es gesteuert wird. Um die künftige Bewegung des Flugzeuges genau vorauszusagen, reicht also eine Kenntnis der Gesetze der Mechanik allein nicht aus.

Wir haben uns überlegt, dass das Flugzeug nach den Gesetzen der Mechanik abstürzen müsste. Und es beginnt tatsächlich zu fallen, doch die sichere Hand des Piloten betätigt einen Hebel, der das Höhenleitwerk bewegt - und das Flugzeug kehrt in seine normale Lage zurück. Fliegt ein Flugzeug von Moskau nach Nowosibirsk, so gerät es unter dem Einfluss der Nordwinde nicht etwa nach Karaganda.

Wenn es von seinem Kurs abkommen sollte, wird dieser korrigiert. Es scheint, als ob die äußeren Kräfte ihre Wirksamkeit auf das Flugzeug eingebüßt hätten.

Haben sie das tatsächlich? Ein Funksignal wird aufgefangen. Es besagt, dass der Nowosibirsker Flughafen in dichtem Nebel liegt. Das Flugzeug muss entweder doch Karaganda aufliegen oder nach Moskau zurückkehren.

Daraus folgt, dass bestimmte äußere Faktoren den Kurs des gesteuerten Flugzeuges verändern können, aber das Resultat dieser Einflüsse ist nicht von der physikalischen Kraft dieser Faktoren abhängig, sondern von den Vorgängen, die sie im Gehirn des Piloten hervorrufen.

"Lohnt es sich überhaupt, darüber zu reden?" könnte man fragen. Es ist doch klar, wenn ein Flugzeug von einem Menschen gesteuert wird, so fliegt die Maschine in einer bestimmten Richtung, sie steigt oder sinkt, wie es der Pilot festlegt; die Flugbahn ist weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen.

Aber dieser Einwand ist nicht so stichhaltig, wie es auf den ersten Blick scheint. Wenn man davon spricht, dass der Zustand eines Systems (im gegebenen Falle des Systems Flugzeug-Pilot) bekannt ist, so versteht es sich, dass dabei alle Faktoren, die auf das künftige Schicksal des Systems Einfluss nehmen können, berücksichtigt sind.

Das bedeutet - da der Pilot ein Teil des betrachteten Systems ist -, dass auch sein "Zustand" bekannt ist: seine Kenntnisse, Erfahrungen, Reaktionsweisen und Entschlüsse, und nicht nur der Zustand des Flugzeugs.

Im Krieg, als es notwendig war, Luftangriffe abzuwehren, berechnete man den Treffpunkt des Abwehrgeschosses mit dem Flugzeug zunächst unter der Voraussetzung, dass sich das Flugzeug gleichförmig, d.h. ungesteuert, bewegt.

Aber eine Gruppe von Mathematikern unternahm den Versuch, bei der Berechnung auch wahrscheinliche Ausweichmanöver des Flugzeugs zu berücksichtigen. Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnte die Abschussquote tatsächlich erhöht werden.

Die Praxis zeigt, dass man beliebig genau vorausbestimmen kann, wie nicht nur ein ungesteuertes Flugzeugmodell, sondern auch ein gesteuertes Flugzeug auf Windeinflüsse reagiert. Wenn das Flugzeug infolge äußerer Einflüsse vom geforderten Regime abweicht (also unvorhergesehen vom Kurs abgedrängt wird, seine Geschwindigkeit ändert, an Höhe verliert oder ähnliche Ereignisse eintreten), so benötigt der Pilot zunächst eine gewisse Zeit, um diese Abweichung festzustellen.

Danach versucht er, den alten Zustand durch steuernde Einwirkungen auf das Flugzeug wiederherzustellen, dabei überschreitet das Flugzeug im allgemeinen die Daten des geforderten Regimes etwas in entgegengesetzter Richtung; es erfolgt eine neue Korrektur, und erst nach einer gewissen Anzahl von Korrekturen, nach einem "Einpendeln", wird der ursprüngliche Zustand wieder erreicht.

Manchmal wird ein Flugzeug nicht von einem Menschen, sondern von einer zu diesem Zwecke konstruierten Einrichtung, einem Autopiloten, gesteuert, und die Signale von der Erde werden nicht vom Piloten, sondern von Geräten der Funkfernsteuerung aufgenommen.

Der Autopilot und das Funkfernsteuerungssystem haben weder Verstand noch Willen, noch Phantasie wie ein Flugzeugführer, aber sie sind so eingerichtet, dass sie jene Manöver präzise ausführen können, die notwendig sind, um das Flugzeug genau auf Kurs zu halten, oder aber sie können durch Signale der Bodenstation zu den notwendigen Aktionen veranlasst werden.

Beim Bau dieser Geräte mussten die Ingenieure aber wissen, worauf es ankommt, sie mussten

die unter den verschiedenen Bedingungen erforderliche Funktionsweise der Geräte voraussehen. Somit lassen sich gesteuerte und automatische Systeme mit den Mitteln der exakten Wissenschaften erforschen. Worin besteht nun der Unterschied zwischen diesen und gewöhnlichen Systemen?

Bei der Beobachtung von gesteuerten und automatischen Systemen entsteht bei uns zunächst der Eindruck von etwas "Selbständigem", von äußeren Einflüssen Unabhängigem. Doch das ist ein allzuwenig begründeter Schluss, zumal auch ein Stein "von selbst" fällt und die Erde sich "von selbst" um die Sonne bewegt, ohne dass sie jemand antreibt.

Weiter kommt uns in den Sinn, dass der Unterschied mit einer bestimmten Auswahlmöglichkeit gegenüber äußeren Einwirkungen zusammenhängen könnte. Aber auch diese Überlegung überzeugt nicht: Schließlich verhalten sich ein Stein und eine Flaumfeder gegenüber dem Wind und dem Feuer verschiedenartig, sie zeigen also Auswahlmöglichkeit.

Bei einer Untersuchung verschiedener weiterer Merkmale von Systemen stoßen wir schließlich wieder auf eines, das sich als höchst allgemein erweist und gleichzeitig eine exakte, quantitative Definition des Begriffs Automatismus ermöglicht: auf die Wahrscheinlichkeit der Zustände.

Die Gesetze der Mechanik verbieten nicht, dass sich ein Flugzeug in der Luft hält. Aus diesen Gesetzen ergibt sich lediglich, dass der gegebene Flugapparat in der realen Atmosphäre mit ihren Strömungen und Wirbeln im Mittel in 95 von 100 Fällen seinen Gleichgewichtszustand verliert, d.h. abstürzt. So groß ist das zahlenmäßige Verhältnis der ungünstigen Fälle zu den möglichen Fällen.

Die Aufgabe des Flugzeugführers oder des Autopiloten besteht nun darin, das Flugzeug während des Fluges in einem stabilen, aber wenig wahrscheinlichen Zustand zu halten, und andere, wahrscheinlichere, aber unerwünschte Zustände auszuschließen.

Allgemeine Überlegungen über die Wahrscheinlichkeit zufälliger Ereignisse (z.B. des Ereignisses, dass das Flugzeug abstürzt) sind schon deshalb nützlich, weil die Wahrscheinlichkeit durch eine Zahl gegeben wird.

Wenn die Anzahl der gleichmöglichen Fälle, deren Eintreten auf das Eintreten des betrachteten Ereignisses Einfluss nimmt, endlich ist, so ist diese Zahl ein Bruch. Im Zähler dieses Bruches steht die Anzahl der günstigen Fälle, d.h. jener Fälle, bei denen das Ereignis eintritt. Im Nenner dieses Bruches steht die Anzahl aller möglichen Fälle.

Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses liegt stets zwischen den Zahlen 0 und 1. Die Wahrscheinlichkeit 0 haben Ereignisse, die unmöglich sind, also niemals vorkommen können; die Wahrscheinlichkeit ist gleich 1 für Ereignisse, die sicher sind, d.h. unter allen Umständen eintreten. Kennt man die Wahrscheinlichkeit einfacher Ereignisse, so kann man die Wahrscheinlichkeit komplizierterer Ereignisse, die sich aus jenen Ereignissen auf mannigfache Art und Weise aufbauen, berechnen.

Die Wahrscheinlichkeit ist nicht für beliebige zufällige Ereignisse definiert, sondern nur für solche, deren Auftreten unter kontrollierbaren, reproduzierbaren Bedingungen vor sich geht, sogenannte Massenereignisse.

Will man etwas über die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses erfahren, so stellt man die Bedingungen, unter denen das Ereignis untersucht wird, zu wiederholten Malen her - d.h., man unternimmt eine Folge von "Versuchen" - und zählt einerseits die Anzahl der Versuche und andererseits, wie oft bei diesen Versuchen das betrachtete Ereignis eingetreten ist.

Der Bruch, dessen Zähler angibt, wie oft das Ereignis bei einer Versuchsfolge eingetreten ist,

und dessen Nenner die Anzahl der Versuche in dieser Folge angibt, wird als relative Häufigkeit des Ereignisses bei dieser Versuchsfolge bezeichnet.

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass diese relative Häufigkeit, die theoretisch von einer Versuchsfolge zur anderen eine andere Zahl sein kann, sich mit wachsender Anzahl der Versuche einem bestimmten Wert annähert. Bei zwei verschiedenen Folgen von Versuchen ergibt sich also nahezu die gleiche relative Häufigkeit für das Ereignis, wenn nur die Anzahl der Versuche in beiden Folgen genügend groß ist.

Der Wert, dem die relative Häufigkeit in diesem Sinne zustrebt, ist die Wahrscheinlichkeit des betrachteten Ereignisses. Unsere Überlegungen über die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses können wir also stets in der Praxis überprüfen, indem wir eine Folge von Versuchen durchführen und die relative Häufigkeit berechnen.

Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die relative Häufigkeit bei einer großen Anzahl von Versuchen merklich von der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses abweicht. Dennoch sind relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit verschiedene Dinge, die relative Häufigkeit macht eine Aussage über die Vergangenheit, die Wahrscheinlichkeit sagt uns dagegen etwas über das zukünftige Eintreten des Ereignisses.

... Ja, ein Stein fällt ...

Wir können sein Verhalten beim Fallen ohne Schwierigkeit mit Hilfe bestimmter mathematischer Gleichungen berechnen, unabhängig davon, ob er nun von einem Turm oder aus einem fliegenden Flugzeug geworfen wird. Doch wenn sich von einem Berg eine Lawine löst, bei der die Steine gegeneinanderprallen, dann führen diese Steine Bewegungen aus, die - bewirkt durch ihre Zusammenstöße - äußerst kompliziert sind.

Ebenso kompliziert sind die Gleichungen, durch die ihre gemeinsame Bewegung dargestellt wird. Die Bewegung einer Lawine von z.B. 200 Steinen ist nicht einfach die Summe der Einzelbewegungen dieser 200 Steine, da sich die Steine beim Niedergehen der Lawine gegenseitig beeinflussen.

Um die Bewegung der Moleküle in einem Kubikzentimeter Luft bei null Grad Celsius unter normalem Atmosphärendruck darzustellen, wäre, wie man ausgerechnet hat, ein System von dreißig Trillionen Gleichungen notwendig, von denen jede dreißig Trillionen Unbekannte enthält. Um auszurechnen, wie sich jedes der Moleküle in diesem Kubikzentimeter Luft während einer Sekunde bewegt, wären etwa eine Billion Jahre - das sind über zwanzig Milliarden Menschengenerationen - erforderlich. Das ist zuviel Zeit!

Um nicht für genaue Lösungen unermesslich viel Kraft aufwenden zu müssen, gaben die Mathematiker und Physiker die Strenge der klassischen Mechanik auf und griffen zur Statistik, die es ermöglicht, die Erscheinungen in ihren allgemeinen Zügen zu beschreiben. Damit erreichen sie in verhältnismäßig kurzer Zeit befriedigende Ergebnisse, die durch die Erfahrung bestätigt werden.

In einem System, das aus einer Vielzahl einander beeinflussender Teile besteht, bewirken also die quantitativen Veränderungen der Teile nicht nur quantitative Veränderungen des Systems, sondern es entstehen unter Umständen neue, "emergente" Qualitäten, die gegebenenfalls sogar den Einzelercheinungen, den Elementen der komplizierten Erscheinung, widersprechen können.

"Wenn ein System" - so führt Ashby aus - "sich durch große Unterschiede in den Abmessungen zwischen den einzelnen Elementen und dem gesamten System auszeichnet, so sind häufig die

Eigenschaften des Systems von den Eigenschaften der Elemente sehr verschieden."

Alle Steine fallen abwärts, doch es ist nicht ausgeschlossen, dass es innerhalb einer Lawine einige Steine gibt, die sich zeitweise aufwärts bewegen, bedingt durch die gegenseitigen Zusammenstöße der Steine in der Lawine. Wenn es uns gelänge, alle Zusammenstöße zu berechnen, so würde die "Emergenz" verschwinden, und wir würden die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung aus den Fall- und Stoßgesetzen herleiten können.

Eine derartige vollständige Berechnung ist jedoch praktisch unmöglich, man muss daher die Lawinenbewegung als etwas auffassen, das auf einem anderen Beobachtungsniveau liegt, das durch neue Gleichungen erfasst wird, d.h., man muss sie als eine besondere Form der Bewegung ansehen.

Wir sind uns darüber im klaren, dass die fallenden Steine insgesamt ein besonderes System bilden, das ein bestimmtes Niveau einer dynamischen "Organisation" besitzt.

Die Anzahl der "punktartigen" Elemente, die an den Steuerungsprozessen beteiligt sind, ist im allgemeinen so groß, dass es praktisch unmöglich ist, das Verhalten eines Automaten durch Formeln der klassischen Mechanik oder auch der statistischen Physik zu beschreiben, obgleich der Automat in seiner Funktionsweise den Naturgesetzen folgt. Dazu sind gewisse neue Prinzipien notwendig, und zwar solche, die eine quantitative Erfassung und eine experimentelle Überprüfung bei praktisch zulässigem Zeitaufwand ermöglichen.

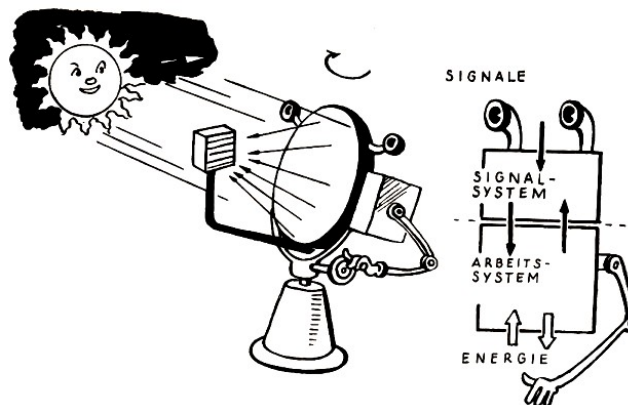


Bild 3.1.: Die Abbildung zeigt einen vollständigen Automaten, der die Sonnenstrahlen auffängt, sie in Elektrizität und diese schließlich in mechanische Energie umwandelt, die er zu seiner Ausrichtung auf die Sonne verwendet. Der Automat besteht aus zwei Systemen: einem Arbeitssystem, das diese Ausrichtung durchführt, und einem Signalsystem, das die Kommandos dazu gibt. Die Tätigkeit des Signalsystems besteht in der Umwandlung von Signalen, die den Zustand des Arbeitssystems und der Umgebung widerspiegeln, in Kommandos an das Arbeitssystem.

Am Beispiel des fliegenden Flugzeugs macht man sich leicht klar, dass wir unsere Aufmerksamkeit nicht nur dem untersuchten Automaten, sondern auch seiner Umgebung widmen müssen. Das aus Automat und Umgebung bestehende Gesamtsystem ist ein abgeschlossenes physikalisches System<sup>10</sup>, das in zwei (im physikalischen Sinne) offene Systeme, eben den Automaten und seine Umgebung, zerfällt. Welche Beziehungen bestehen zwischen diesen beiden Teilsystemen?

Eine Beziehung zwischen einem Automaten und seiner Umgebung ist sehr einfach:

<sup>10</sup>Ein physikalisches System ist abgeschlossen, wenn es weder Stoff noch Energie mit seiner Umgebung austauscht. Ein fliegendes Flugzeug ist also kein abgeschlossenes physikalisches System, denn es gibt ständig mechanische Energie und Wärme an seine Umgebung ab.

Jeder Automat empfängt Energie aus der Umgebung und gibt umgekehrt Energie wieder an die Umgebung zurück. Er erhält Energie mit einem hohen Grad von Verwandlungsfähigkeit, mit geringer Entropie, und gibt dagegen im wesentlichen nur Wärme ab, die zu keiner weiteren Umwandlung mehr fähig ist.

Aber auch die Aufspaltung in zwei Teilsysteme kann noch nicht erklären, warum im kleineren Teilsystem Ordnung und im größeren Unordnung herrscht.

Dann spalten wir den Automaten selbst in zwei - ungleiche - Teile auf: in das steuernde und in das gesteuerte System. Zwischen beiden Systemen kann man Beziehungen feststellen, die auf Signalen beruhen. Der Begriff Signal ist kein Forschungsgegenstand der Physik.

Aus einem Brief Robert Mayers geht hervor, dass dieser Gelehrte bei der Formulierung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie von einem sehr allgemeinen Naturgesetz ausgegangen ist: "Die Wirkung ist der Ursache gleich."

Aber ein Signal ist eine Ursache, die vielfach nicht gleich der Wirkung ist. Deshalb werden durch Signale bedingte Beziehungen von der Physik als "nichtenergetische" Phänomene nicht weiter untersucht.



Bild 3.2.: Kugeln, die in diese Vorrichtung eingeworfen werden, verteilen sich im linken Teil der Vorrichtung entsprechend dem Gesetz der großen Zahlen. Im rechten Teil der Vorrichtung dient eine kleine Erhöhung als Signal; dieses Signal verändert die Verteilung der Kugeln auf die Fächer.

Jedes Signal ist eine physikalische Erscheinung - mechanische Bewegung, Wärme, elektrischer Strom, Licht. Doch die Wirkung des Signals ist in keiner Weise mit der ihm innewohnenden Energie vergleichbar. Ein leichter Druck auf einen Knopf kann die Sprengung eines ganzen Gebirgsmassivs bewirken, obwohl die physische Kraft eines Knopfdrucks vielleicht gerade eine Mücke zu zerquetschen vermag. Ein belangloses Telefongespräch über das Wetter erfordert nicht weniger Energie als eine Anordnung von größter Tragweite. Einen Geldschrank zu knacken ist bei weitem schwerer, als ihn mit dem Schlüssel zu öffnen: Unterschiedlicher Energieaufwand führt hier zum gleichen Resultat.

Der deutsche Biologe O. Bütschli hat im Jahre 1901 den Gedanken ausgesprochen, dass bei der Lösung der um den Begriff "Zielstrebigkeit" gruppierten Probleme vor allem die eigentümliche "Signalform" der Kausalität beachtet werden müsse, die er als System von "Auslösungsursachen" bezeichnete.

"Eine der Quantität nach äußerst geringfügig wirkende Ursache, welche das eine Gewicht von dem einen Waagebalken herabwirft, bedingt nun, dass das andere Ende des Balkens mit dem darauf befindlichen Gewicht sinkt und dabei eine Quantitätsveränderung bewirkt, welche diejenige vielmals übertreffen kann, welche das erste Gewicht entfernte. In der Regel bezeichnet man nun die das eine Gewicht entfernende wirkende Ursache als die 'Auslösungsursache', deren Wirkung die damit in auffallendem quantitativen Missverhältnis stehende Senkung des entgegenstehenden Waagebalkens sei.



Bei näherer Überlegung des geschilderten Falles ergibt sich jedoch leicht, dass es sich dabei nicht um eine einfache Kausalabhängigkeit handelt, sondern um eine wiederholte, oder eine sogenannte 'Kausalkette'.<sup>11</sup>

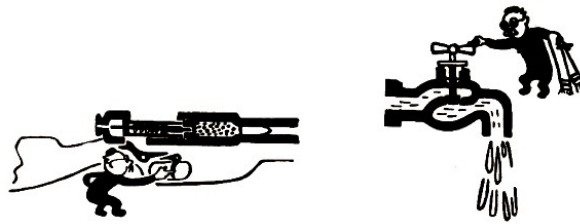


Bild 3.3.: Ein leichter Druck auf den Abzug des Gewehrs - dieses Signal gibt den Schlagbolzen frei und zündet so die Ladung, deren Verbrennungsgase das Geschoss aus dem Lauf treiben.

Bild 3.4.: Ein gewöhnlicher Wasserhahn steuert die Bewegung des strömenden Wassers; wird er gedreht, so ist das auch ein Signal.

Jeder Automat - oder wenigstens sein gesteuerter Teil - enthält einen oder mehrere Verstärker, welche die für die zu steuernden Aktionen erforderliche potentielle Energie enthalten und bei Bedarf auf ein Signal, einen Anstoß hin, diese potentielle Energie in die kinetische Energie der Aktion umsetzen. Dadurch wird die Steuerung realisiert.

Steuerungsvorgänge können auch zufällig, sozusagen spontan, ohne Einwirkung eines Willens und eines Bewusstseins in der Natur vorkommen. Sie erscheinen und verschwinden jedoch, ohne einen merklichen Eindruck im allgemeinen Fluss der Ereignisse zu hinterlassen.

... Von einem Berg rollt eine Lawine; Schneemassen stürzen infolge der Schwerkraft mit Getöse talwärts. Andere Umstände - die Beschaffenheit des Bergprofils, die Masse der Lawine - bestimmen die Richtung ihres Niedergehens.

Doch kann es vorkommen, dass einander entgegenwirkende Umstände gleichzeitig so auf die Lawine einwirken, dass sie gewissermaßen labil, durch kleinste Einflüsse lenkbar wird. Dann kann irgendein zufällig in die Lawine hineingeratener Stein ihre Richtung nach rechts oder links ablenken.

Die Kraft, mit der ein einzelner Stein auf den Vorgang einwirkt, ist im Vergleich zur riesigen Wucht der Lawine außerordentlich klein, doch seine Anwesenheit ist in diesem Moment entscheidend; in diesem Augenblick steuert ein Stein die ganze Lawine.

Damit ein Signal ein System steuern, d.h. zur Ausführung einer bestimmten Aktion veranlassen kann, muss es diesem System angepasst sein, also von ihm aufgenommen und "verstanden" werden können. Die Energie des Signals dient daher nur zur Auslösung des Prozesses - die zu seiner Ausführung erforderliche Energie ist im gesteuerten System gespeichert.

Wenn ein Stein, der einen Bergabhang hinunterrollt, mit einem anderen Stein zusammenstößt, so läuft ein gewöhnlicher physikalischer Vorgang ab; in quantitativer Hinsicht spielen dabei Masse, Fallhöhe und Elastizität der Steine eine Rolle. Nehmen wir an, dass in der Fallbahn des Steines eine große, durch einen Stock unterstützte Steinplatte aufgestellt ist. Der Stein trifft diesen Stock, die Platte gerät aus dem Gleichgewicht und fällt um.

Die Masse des Steins, der den Stock trifft, und seine Auftreffgeschwindigkeit stehen in keiner Beziehung zu der Kraft, die beim Sturz der Platte wirksam wird. Für die Auslösung dieses Sturzes kommt es nur auf eines an: Wann reicht die Stoßkraft des Steines aus, um die Platte zu Fall zu bringen, und wann nicht?

Die quantitative Seite der Wirkung, die vom gegebenen Signal ausgelöst wird, hängt nur vom

---

<sup>11</sup>O. Bütschli: Mechanismus und Vitalismus. Leipzig 1901, Seite 12.

Gewicht und der Fallhöhe der Platte ab, nicht aber von den Eigenschaften des Steins, der die Platte umwirft.

Im gesteuerten System (z.B. der Platte, die durch einen Stock unterstützt wird) gibt es eine gewisse qualitative Charakteristik, die wir Ansprechbarkeit auf Signale nennen. Im gegebenen Beispiel hat die Platte die Alternative "umfallen - stehenbleiben". "Umfallen!" kommandiert der Stein, und die Platte fällt um.

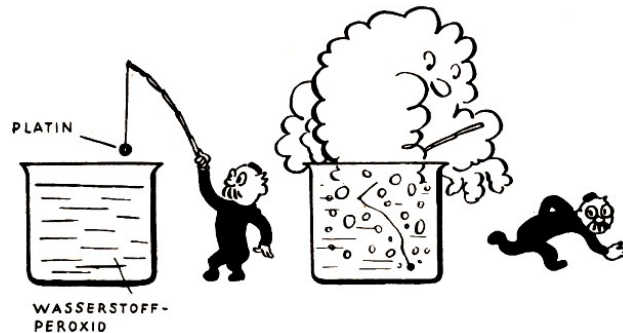


Bild 3.5.: Das Einbringen einer sehr kleinen Menge eines Katalysators (z.B. Platin) in einen chemisch instabilen Stoff (z.B. Wasserstoffperoxid) löst eine stürmische Zerfallsreaktion aus. Das ist die Wirkung eines auslösenden Signals.



Bild 3.6.: Ein periodischer Automat von der Art der halbphantastischen "Dauerfalle" kann sehr unkompliziert sein. Wenn dieses System so mit seiner Umgebung abgestimmt ist, dass es aus dieser aktive Energie entnehmen kann, so bleibt seine Auslösbarkeit unverändert.

Dadurch, dass das gesteuerte System auf gewisse Signale anspricht und auf andere nicht, entsteht eine Auswahlmöglichkeit des Systems für äußere Einwirkungen: Einige dieser Signale sind dem System angemessen, d.h. lösen es aus, andere aber nicht.<sup>a</sup> Ist der Stein in unserem Beispiel sehr leicht und seine Geschwindigkeit nur gering dann werden Platte und Stock durch sein Auftreffen nicht aus dem Gleichgewicht gebracht. Das Auftreffen dieses Steins ist dann eben kein angemessenes, also kein auslösendes Signal.

Jedes energetisch abgeschlossene gesteuerte System, das dem beschriebenen System "Steinplatte-Stock" ähnelt, heißt auslösbar.<sup>b</sup> Unter der Einwirkung eines auslösenden Signals geht es von einem weniger wahrscheinlichen Zustand in einen wahrscheinlicheren Zustand über, aber nicht umgekehrt.

<sup>a</sup>Genauer fasst man den Begriff des Signals häufig so: Ein Signal für ein bestimmtes gesteuertes System ist eine Klasse aller äußeren Einwirkungen, die bei diesem System die gleiche Wirkung hervorrufen. In diesem Sinne gibt es für das System unseres Beispiels im wesentlichen nur zwei Signale, nämlich die Klasse aller Einwirkungen, die die Platte umwerfen (dazu gehört z.B. auch ein kräftiger Fußtritt gegen den Stock), und die Klasse aller Einwirkungen, die zu schwach sind, um das System auszulösen (zu dieser Klasse gehört z.B. ein schwacher Windstoß).

<sup>b</sup>Das heißt, es befindet sich physikalisch in einem instabilen Gleichgewichtszustand.

Für einen Gedankenversuch mit einer einfachen Falle vom Typ "Platte-Stock" gibt es min-

destens vier Möglichkeiten.

Bei der ersten Variante zerbricht der Stock oder rutscht aus irgendeinem Grund weg, und die Platte fällt um. Das ist ein "reiner Zufall

Im zweiten Fall ist eine Schnur an den Stock gebunden, deren Ende von einem Menschen gehalten wird, der auf Beute lauert. Wenn ein Tier in die Falle geht, zieht er an der Schnur, die Platte fällt um und erlegt das Tier. Diese Falle ist ein gesteuertes System, das Befehle von außen empfängt; die Quelle seiner Zielstrebigkeit liegt außerhalb des Systems, nämlich im Menschen mit seinem Gedächtnis und der Fähigkeit zu sehen, zu hören und an der Schnur zu ziehen.

Die dritte Möglichkeit besteht darin, dass der Mensch den Stock so aufstellt, dass das Tier ihn umstößt, wenn es in die Falle geht. Er hat damit eine selbsttätige Falle gebaut, d.h. einen Automaten, der von sich aus zielstrebig funktioniert. Hat die Falle ein Tier erschlagen, so kommt der Mensch, entfernt es und versetzt die Falle wieder in den instabilen, auslösbaren Zustand (er stellt die Falle auf), wobei er aktive Energie aufwenden muss.

Es ist auch möglich, dass die Platte dem Menschen auf den Kopf fällt, weil er beim Aufstellen der Falle durch ein Missgeschick den Stock umstößt. Dabei stellt sich ein Mangel in der Zielstrebigkeit dieses primitiven Systems heraus.

In der vierten Variante gelingt es dem gefangenen Tier, das Gewicht der Platte durch eigene Kraft zu überwinden und die Falle wieder in ihre ursprüngliche Lage zu bringen.<sup>12</sup> Es muss dabei Energie aufwenden. Das System der Falle bleibt dem Tier verborgen, schließlich stellt das Tier die Falle ja nicht bewusst wieder auf. Es bewegt sich nur nach verschiedenen Seiten, und dadurch hebt es die Platte an, und der Stock rückt zufällig wieder an die richtige Stelle. Das Tier hat sich befreit und läuft weg. Doch die Falle wurde wieder aufgestellt, sie ging wieder in den auslösbaren Zustand über. Der Automat ist in diesem Fall ein periodischer Automat, er kann so auf unbestimmte Zeit, bis zu seiner natürlichen Abnutzung, funktionieren.

Wir sehen, dass sich ein Nichtautomat, d.h. eine Einrichtung, die von außen gesteuert wird, von einem Automaten nur sehr geringfügig zu unterscheiden braucht.

Es gibt eine Rangordnung der Automatismen, bei welcher der Rang eines Automatismus nicht durch seine Kompliziertheit allein bestimmt ist.

Ein Automat besteht aus zwei Teilen, dem steuernden, der die Signale aufnimmt, verarbeitet und Befehle an den zweiten, den gesteuerten Teil, gibt. Dieser Teil enthält die Energiespeicher und führt die Aktionen aus.

Betrachten wir unser System "Stock-Steinplatte" noch einmal unter diesem Aspekt. Handelt es sich dabei um eine Falle, die dadurch betätigt wird, dass ein Mensch an einer an dem Stock befestigten Schnur zieht, dann überträgt der Stock Befehle, die dem System von außen erteilt werden. Die Schnur bildet einen Kanal, durch den die Befehlssignale dem Stock, dem Eingang des Systems für Signale, zugeführt werden. Die automatische Falle ist dagegen ein Automat; der Stock ist das Steuerungssystem, das die durch eine Berührung eines Tieres vermittelte Nachricht "ein Tier ist in der Falle" in den Befehl "umfallen" an die Steinplatte, den gesteuerten Teil des Automaten, verwandelt.

Das Steuerungssystem besitzt die Fähigkeit, zufällige äußere Einwirkungen - Nachrichten - in Befehle für zielgerichtete Aktionen umzuwandeln.

---

<sup>12</sup>Die Möglichkeit, dass das Tier sich befreit, ohne die Falle wieder aufzustellen, wird nicht betrachtet.

Ein periodischer Automat ist ein System, das sich selbst in einem wenig wahrscheinlichen Zustand erhält oder von einem Zustand in einen anderen, ebenso "unwahrscheinlichen", Zustand übergeht, und zwar ohne Anstoß, ohne Befehl von außen.

Ein solches System kann energetisch nicht abgeschlossen sein. Ein Staubsauger schafft Ordnung, aber nur dann, wenn er an die Steckdose angeschlossen wird. Man kann ihn zwar so vervollkommen, dass es nicht mehr notwendig ist, ihn mit der Hand zu den staubbedeckten Stellen zu führen und sich zu merken oder am Glanz des Parketts festzustellen, wo schon gesaugt wurde.

Aber man kann ihn nicht so vervollkommen, dass er keine Energie verbraucht. Solange der Staubsauger kein Automat ist, muss die Hausfrau selbst mit dem Staubsauger zusammen ein vollständiges automatisches System bilden; unter Umständen werden sogar noch andere Familienmitglieder durch Ratschläge und Hinweise in die Operationen dieses Systems eingreifen.

Jedes automatische System ist energetisch offen, d.h. tauscht Energie mit seiner Umgebung aus, und relativ abgeschlossen gegenüber der Steuerung, d.h., es kann bestimmte Aktionen selbsttätig ausführen, ohne dass dazu ein Befehl von außen gegeben werden muss.

Wenn ein Jäger eine Falle aufstellt und diese ein Tier für ihn fängt, so haben wir es mit einem Vorgang zu tun, bei dem Zielstrebigkeit eine Rolle spielt. Zweifellos handelt die Falle zielstrebig, wenn sie ein Tier fängt. Aber das Ziel der Falle wird vom Jäger bestimmt, der die Falle einrichtet und dabei Energie aufwendet. Woher kommt die Zielstrebigkeit des Jägers? Wer bestimmt sein Ziel? Sein Ziel ist doch offenbar, Tiere zu erbeuten, nur dazu stellt er die Falle auf.

Um zu leben, muss der Jäger essen und sich vor der Witterung schützen, er braucht das Fleisch und den Pelz erbeuteter Tiere. Sein Ziel wird ihm von seinem Selbsterhaltungstrieb diktiert, einer Form der Zielstrebigkeit, die, im Prozess der natürlichen Auslese entstanden, allen Lebewesen von Natur aus eigen ist.

Umgekehrt könnten wir aber auch den Jäger als Mittel zur Verwirklichung des Ziels der Falle betrachten: Wenn der Jäger keine Falle aufstellt, muss er umkommen, wenn er dagegen die Falle aufstellt, dann muss die Falle ein Tier für ihn fangen.

Die letzte Überlegung überzeugt uns nur deshalb nicht, weil wir glauben, dass der Jäger die Funktionsweise der Falle voraussehen kann und sich bewusst ist, dass die Falle ein Mittel zur Verwirklichung seiner Ziele ist, wir aber der Falle - einem Stein also — solche Einsicht und Voraussicht absprechen. -

In der oben beschriebenen vierten Variante funktioniert das System "Steinplatte-Stock" periodisch, es bildet einen periodischen Automaten. Da die Steuerung bei einem derartigen System in dem Sinne vollständig ist, dass keine Einwirkung von außen (z.B. das Entleeren und Spannen unserer Falle) mehr erforderlich ist, bezeichnen wir es auch als vollständigen Automaten.

Ein vollständiger Automat ist jedoch den Interessen des Menschen gegenüber indifferent - die "periodische Falle" fängt nichts.

In Bezug auf die Zuführung von hochwertiger Energie ist das Verhalten dieses Systems jenem der gesamten belebten Natur sehr ähnlich. Aus unseren Überlegungen ergibt sich, dass wir die Existenz eines Automaten als Kriterium dafür ansehen müssen, dass dieser Automat zielstrebig, nämlich selbsterhaltend reagiert.

Dabei verstehen wir unter Existenz, dass der Automat im "Zustand des Seins" ist, d.h., dass seine Entropie geringer ist als die seiner Umgebung.



Bild 3.7.: Wenn ein beliebiger Automat arbeitet, dann wandelt er aktive Energie in nutzlose Wärme um, die sich im Raum verteilt. Die Quelle der aktiven Energie für die Lebewesen und für die Mehrzahl der Maschinen ist die Sonne.

Unsere periodische Falle ist ein Automat, der den "Zustand des Seins" aufrechterhält, solange die Tiere, die in diese Falle gelangen, nur wie oben beschrieben, reagieren. Das System steht fürwahr vor der Hamletfrage "Sein oder Nichtsein".

Die Wahrscheinlichkeit des "Seins" hängt von der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten auf die verschiedenen Zustände des Systems und seiner Umgebung ab. Im Grunde genommen hat das von uns ersonnene System wenig Aussichten, sich zu erhalten. Das Tier bewegt sich anders, und der Stock trägt den Stein dann nicht; es regnet und der Stein rutscht weg; ein anderer Stein fällt auf die Platte, und der Stock bricht - das alles sind nach unseren Maßstäben sehr wahrscheinliche Ereignisse, und solange diese Ereignisse eintreten können, ist die Wahrscheinlichkeit ziemlich gering, dass die periodische Falle im gespannten Zustand, also auf einem relativ zur Umgebung niedrigeren Entropieniveau, bleibt.

Indessen kann sich offensichtlich ein komplizierter aufgebautes System auch unter diesen Umständen sein Entropieniveau erhalten, es kann diesen Umständen widerstehen oder ihnen entgehen, wie etwa der Jäger.

Inwieweit dieses Kriterium für das Vorliegen von Zielstrebigkeit bei einem gegebenen Automaten erfüllt ist, kann man durch eine Zahl zwischen Null und Eins ausdrücken: durch die Wahrscheinlichkeit des Zustandes "Sein", eine Größe, die von der Kompliziertheit des Automaten und von der Mannigfaltigkeit der Bedingungen in seiner Umgebung abhängt.

Es ist klar, dass manche unserer am Beispiel der Falle durchgeführten Überlegungen auf Widerspruch stoßen, allein deshalb, weil dieses System relativ unkompliziert ist. Aber durch den Begriff "Automat" wird dieses System ebenso erfasst wie eine Maschine mit weit komplizierterem Aufbau, zu deren Einschätzung unsere allgemeinen Gesichtspunkte nicht nutzlos sind.

... Wir stellen uns eine eingezäunte asphaltierte ebene Fläche irgendwo im Tropenwald vor. Darauf bewegen sich langsam irgendwelche schildkrötenähnliche Wesen mit mattglänzenden grauen Panzern.

Beobachten wir diese Wesen eine Zeitlang aus größerer Entfernung, so kommen wir zu der

Überzeugung, dass ihre Handlungen zielgerichtet sind, dass sie irgend etwas suchen. Zunächst mag es scheinen, als ob wir lebende Wesen oder zumindest ferngesteuerte Mechanismen vor uns haben, die nach dem Willen und den Einfällen eines unsichtbaren Lenkers, eines Menschen, ihre Bewegungen ausführen.



Bild 3.8.: Die kybernetischen Schildkröten können für sich selbst sorgen, solange die Bedingungen in ihrer Umgebung erhalten bleiben, denen sie angepasst sind.

Tatsächlich aber sind es Automaten, die aus solchen absolut unbelebten Stoffen wie Metall, Kautschuk, Glas und Halbleiterkristallen bestehen. Die Menschen, die diese Automaten geschaffen haben, können sich beliebig weit von ihnen entfernen, sie können sogar vergessen, dass diese Automaten existieren, und wenn sich in deren Nähe ein am Versuch beteiligter Mensch aufhält, so wacht er lediglich darüber, dass jene Bedingungen in der Umgebung erhalten bleiben, die den Automaten zgedacht und denen die Automaten vollkommen angepasst sind.

Die seltsamen Wesen besitzen Räder zur Fortbewegung, die von einem Elektromotor angetrieben werden. Der notwendige elektrische Strom wird von Sonnenbatterien, die sich - wie bei den künstlichen Erdsatelliten - außen am Panzer befinden, erzeugt und in einem Akkumulator gespeichert.

Wird eine derartige "Schildkröte" von der Sonne beschienen, so erzeugen die Batterien elektrischen Strom; er fließt in den Akkumulator. Ist der Akkumulator aufgeladen, so würde ihm eine weitere Stromzufuhr schaden. Es ließe sich zwar leicht ein Schalter konstruieren, der die Stromzufuhr im gegebenen Augenblick unterbricht, doch die Ingenieure haben eine kompliziertere Lösung erdacht.

Wenn der Akkumulator aufgeladen ist, wird das Bewegungssystem des Automaten auf "Suchen" umgeschaltet: Ein Signalsystem tritt in Funktion, das die Ströme vergleicht, die von den verschiedenen Batterien abgegeben werden, und damit die Richtung, aus der die Sonne scheint, feststellt. Der Motor wird eingeschaltet, und das Wesen bewegt sich solange in der Richtung, aus der die Sonne scheint, bis es den Schatten eines größeren Gegenstandes, z.B. eines Baumes am Rande der Lichtung, erreicht hat. Dort bleibt es stehen, denn es hat sein Ziel, den Schatten, erreicht. Das ist für das System notwendig, da anderenfalls durch Überlastung Schäden eintreten können.

Langsam wandert die Sonne über den Himmel, die Schatten auf der Asphaltfläche ändern Länge und Richtung, und die photoelektrischen Schildkröten folgen den Schatten. Die Energie, die im Akkumulator aufgespeichert war, wurde zum Teil vom Motor, zum Teil vom Steuerungssystem verbraucht, die Spannung am Akkumulator ist gesunken. Der Bewegungsmechanismus wird jetzt so gesteuert, dass die Schildkröte das Licht aufsucht: Der Akkumulator wird wieder aufgeladen.

Obleich die Umwelt der automatischen Schildkröten sehr einfach ist - es gibt darin keine Fein-

de, der Boden ist eben und hat einen guten Wasserabfluss, es sind schattenwerfende Bäume vorhanden, und der Platz ist umfriedet -, ist es nicht ausgeschlossen, dass eine Schildkröte bei ihren Bewegungen gegen eine andere Schildkröte stößt.

In diesem Fall schaltet der Mechanismus für einige Sekunden auf die entgegengesetzte Bewegungsrichtung um. Stoßen zwei Schildkröten zusammen, so entfernen sich beide in entgegengesetzter Richtung voneinander; stößt eine Schildkröte auf ein ausgedehntes Hindernis, so entfernt sie sich zunächst, läuft dann aber von neuem gegen das Hindernis an.

Die Konstruktion ist aber so eingerichtet, dass das Hindernis beim zweiten Anlauf nicht mehr an der gleichen Stelle getroffen wird, sondern seitlich davon. Nach einigen Anläufen wird der Rand des Hindernisses erreicht, die Schildkröte geht daran vorbei und strebt dorthin, wohin sie "muss".

Der Skeptiker wird einwenden, dass für eine automatische Schildkröte nichts "notwendig" sein kann, da sie nicht lebt, dass alle ihre Tätigkeiten nur jenen Menschen von Interesse sein können, die diesen sonderbaren Versuch ausführen. Eine solche Meinung ist nicht richtig. Der Konstrukteur der Schildkröte hat nämlich vorausgesehen, was sein Apparat machen muss, damit er keinen Schaden erleidet.

Durch seine Intelligenz hat er nur die natürliche Auslese ersetzt. Niemals hätte er alle Möglichkeiten für Zusammenstöße mit Hindernissen oder für die Verteilung von Licht und Schatten auf der Fläche durchrechnen können. Die Kunst und das Verdienst des Konstrukteurs bestehen darin, dass er die allgemeinen Prinzipien der Funktionsweise seiner Schildkröte so bestimmt hat, dass diese Funktionsweise - die sich aus den "Bedürfnissen" der Schildkröte selbst ergibt - das eine Ziel verfolgt: sie unter den veränderlichen Bedingungen in der Umgebung zu erhalten. Er hat einen vollständigen Automaten geschaffen, obwohl der Automatismus nur in Bezug auf das einzelne Exemplar vollständig ist; die automatische Schildkröte kann sich nicht vermehren und wird durch die natürliche Abnutzung immer anfälliger gegenüber zufälligen Havarien.

Der hier beschriebene Versuch wurde noch nicht durchgeführt. Die elektromotorische Kraft der vorhandenen Sonnenbatterien reicht nicht aus, um einen Motor zu speisen, der das beschriebene System fortzubewegen vermag.

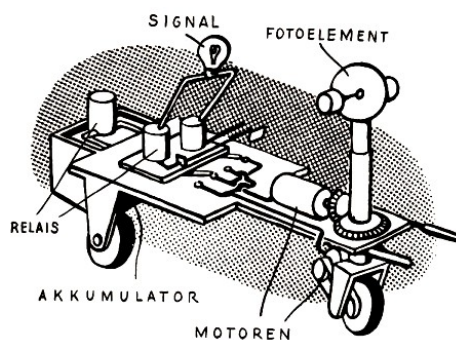


Bild 3.9.: Die elektronische Schildkröte Grey Walters sucht mit Hilfe eines Fotoelements nach einer Lichtquelle.

Doch wurden bereits vor einigen Jahren auf Anregung des englischen Ingenieurs und Psychiaters Grey Walter Schildkröten gebaut, denen ein Licht als Signal für "Futter" diente. Grey Walter hat für seine Schildkröten "Elsie" <sup>13</sup> und "Cora" <sup>14</sup> in der Nähe einer Gleichstromquelle

<sup>13</sup>Elsie: Electro Light Sensitive with Internal and External Stability - lichtempfindliches, elektrisches, intern und extern stabiles System.

<sup>14</sup>Cora: Conditioned Reflex Automaton — Automat, der einen bedingten Reflex ausbilden kann.

eine Lichtquelle so angebracht, dass die Schildkröte mit ihren Kontaktstiften, die zum Aufladen der Akkumulatoren dienen, die Pole der Stromquelle berührt, wenn sie dem Licht nahe zu kommen sucht.

Dieses interessante Demonstrationsexperiment erregte großes Interesse, es wurde in vielen Ländern wiederholt. In der UdSSR wurden ähnliche Konstruktionen im Moskauer Institut für Automatik und Telemechanik sowie in Kiew und Tbilissi gebaut.

Dabei konnte die Notwendigkeit, die Akkumulatoren der Schildkröten aus dem Netz zu speisen, nirgends umgangen werden; damit war die "Reinheit" des Versuchs allerdings etwas eingeschränkt.

Wenn wir aber eine Bedingung verändern, die für die Existenz energetisch offener Systeme so wichtig ist, wie die Energiezufuhr, so entsteht die Frage: Welchem Ziel, welchem Kriterium sind dann alle Formen des Verhaltens dieser Systeme untergeordnet? Haben diese Experimente dann überhaupt einen Sinn?

Im Ausland wurde der Bau "elektronischer Lebewesen" zur Mode. Der französische Ingenieur A. Ducrocq baute einen "Fuchs", der Deutsche E. Eichler und der Österreicher H. Zemanek ihre "Schildkröten". E. Berkeley konstruierte das Modell eines Eichhörnchens, das Kugeln - "Nüsse"-, die ihm zugeworfen werden, aufhebt und verwahrt; jedoch ernährt es sich nicht davon!

Viel interessanter sind - ihrem Prinzip nach - die Experimente mit den Modellen "Ente" und "Käfer".

Ein altchinesisches Spielzeug, eine gläserne Ente, die Wasser trinkt, besteht aus zwei kugelförmigen Gefäßen, die durch eine Röhre verbunden sind. Dieses System ist drehbar gelagert, und zwar liegt der Drehpunkt ein kleines Stück oberhalb des Schwerpunktes. Das Gefäß ist mit Äther und Ätherdämpfen gefüllt.

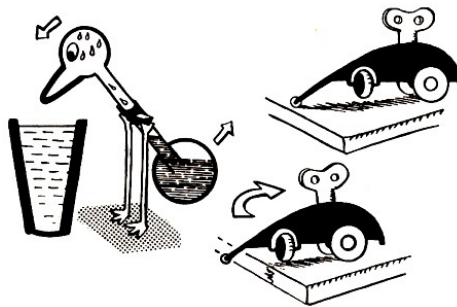


Bild 3.10.: Einfache Spielzeuge: Die chinesische Ente und der absturzsichere Käfer.

Äther verdampft bereits bei Zimmertemperatur. Der "Schnabel", ein stoffumkleideter Fortsatz des oberen Gefäßes, wird befeuchtet und durch die Verdunstung des Wassers abgekühlt. Der Ätherdampf im oberen Gefäß schlägt sich nieder, so dass der Druck dort sinkt und der Äther in der Röhre aufsteigt.

Der Schwerpunkt des Systems verschiebt sich dadurch allmählich, bis die Ente dann plötzlich kippt. In diesem Augenblick taucht der "Schnabel" in ein bereitgestelltes Gefäß mit Wasser, sein Stoffüberzug wird wiederum befeuchtet. Gleichzeitig kommt es zu einem Druckausgleich der Ätherdämpfe in beiden Gefäßen durch die Röhre, und der Äther fließt wieder in das untere Gefäß zurück.

Dadurch richtet sich die "Ente" wieder auf, das System gelangt wieder in seinen ursprünglichen Zustand, und der Vorgang beginnt von neuem. Die Schaukelbewegung wird durch die



Reibung in den Lagern zwar immer gebremst, aber jedes neue Eintauchen bewirkt eine erneute Befeuchtung des "Schnabels" und damit einen neuen Anstoß.

Diese "Ente" ist eine Wärmekraftmaschine mit Kessel und Kühler, die ihr Entropieniveau erhält. Sie schafft die notwendige Anisotropie durch Verdunstung von Wasser, die den Kühler (den "Kopf der Ente") auf einem niedrigeren Temperaturniveau als den Kessel (den "Bauch der Ente") hält.

Der "Käfer" zum Aufziehen ist eine höchst einfache Vorrichtung. Er kann sich zwar nicht selbständig hochwertige Energie aneignen, aber er kann sich davor bewahren, vom Tisch hinabzustürzen. Außer zwei Rädern, die von einem Federwerk angetrieben werden, besitzt er ein freies drittes Rad zur Änderung seiner Bewegungsrichtung; die Laufrichtung dieses Rades bildet mit der Laufrichtung der anderen Räder einen nahezu rechten Winkel.

Ein kleiner "Rüssel" des Käfers liegt auf der Tischplatte auf und hält das dritte Rad solange in Schwebe, bis der Käfer die Tischkante erreicht hat. Dann verliert der Rüssel den Halt, das dritte Rad berührt die Tischplatte, und der Käfer ändert seine Richtung, er bewegt sich nunmehr vom Rand weg, bis der Rüssel wieder auf dem Tisch aufliegt.

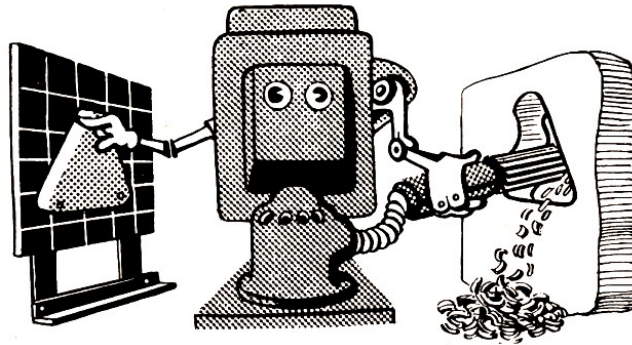
Mit der Zeit sind die Forderungen, die zur Sicherung der Existenzmöglichkeiten für vollständige Automaten an die Umwelt gestellt werden müssen, immer leichter zu erfüllen. Die Konstrukteure können vollständige Automaten bauen, die komplizierten Existenzbedingungen angepasst sind.

Interessant wäre es, z.B. einen Automaten zu schaffen, der an eine Existenz im Wasser angepasst ist. Seine Masse wäre keinen starken Einschränkungen unterworfen.

In unserem Jahrhundert, in dem die stürmische Entwicklung der Raketentechnik den Flug zu anderen Planeten in greifbare Nähe rückt, gewinnt das Interesse an vollständigen Automaten unmittelbar praktischen Wert.

Ehe der Mensch selbst zu anderen Planeten fliegen wird, schickt er bewegliche Automaten dorthin. Solche Raumsonden von der Erde aus zu lenken, wird, nicht immer möglich sein. Wir müssen vielmehr anstreben, dass die Automaten selbst ihre Existenz sichern. Freilich ist das ein Problem, das nicht so leicht zu lösen ist wie die Konstruktion eines absturzsicheren Spielzeugkäfers. Wir kommen auf diese Frage zurück, wenn wir uns mit vollkommeneren automatischen Steuerungssystemen beschäftigen.

## 4 Vollprogrammierte Automaten



Verstärker überall - aber gibt es tatsächlich "Verstärker"? - Die Nichtlinearität - ein Alp der Mathematiker, aber ein Schlüssel zur Verbesserung - Verstärker in der Geschichte der Technik - Der auslösbare und der periodische Automat - Die Programmanlage wird herausgelöst - Sie waren Puppen und wurden Arbeiter - Die Universalmaschine - Die programmierte Welt von Leibniz - Ein Programm ist noch lange nicht alles!

Wenn wir die verschiedenen Dinge unserer Umgebung bezeichnen, so benutzen wir unterschiedliche Wörter; wir sagen z.B. eine Falle, eine Diesellokomotive, eine lebende Zelle, ein Muskel, ein Auto, ein Kran.

Mit jedem dieser Ausdrücke verbinden sich für uns eine bestimmte Menge von individuellen Merkmalen und Kennzeichen, die in ihrer Gesamtheit nur diesen Dingen selbst eigen sind. Für eine Wissenschaft, vor allem für eine so allgemeine Wissenschaft wie die Kybernetik, sind viele konkrete Eigenschaften aber unwichtig. Hier interessiert uns im wesentlichen nur eine Eigenschaft:

In jedes der genannten Systeme werden Signale, Nachrichten oder Kommandos eingegeben, die die Reihenfolge der auszuführenden Aktionen festlegen. Die zur Ausführung dieser Aktionen notwendige Energie wird von den Systemen selbst geliefert. Deshalb kann man alle diese Systeme unter einem Begriff zusammenfassen: unter dem Begriff des Verstärkers.

Die Eigenschaft eines Systems, verstärkend zu wirken, ist emergent. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie verbietet nämlich, dass Systeme mehr Energie abgeben als die Summe der ihnen zugeführten und der in ihnen gespeicherten Energie; daher kann keine fortwährend arbeitende Maschine ein "wirklicher" Verstärker sein.

Andererseits besteht der Zweck eines Verstärkers auch nicht darin, die Ordnung zu vergrößern, denn ein Verstärker verändert die Signale und ihre Reihenfolge nicht, er stattet nur die vorgegebene Ordnung mit neuer "physischer Kraft" aus, er "entwickelt" sie sozusagen. Beispielsweise ruft der photographische Entwickler keineswegs aus freien Stücken eine Landschaft oder ein Porträt auf der Platte hervor, sondern er macht das bereits vorhandene, sogenannte latente Bild nur deutlich sichtbar.

Die Erfindung und Vervollkommnung von Verstärkern kennzeichnen den Entwicklungsweg der Technik von den allerersten Anfängen bis in unsere Tage.

Der Mensch stammt nicht vom Tiger oder vom Elefanten, sondern von sicherlich nicht allzu kräftigen affenähnlichen Vorfahren ab. Seit dem ersten Schritt in der Entwicklung zum homo sapiens war das ganze Streben des Menschen und seiner Vorfahren darauf gerichtet, die Unmöglichkeit, einen "wirklichen" Verstärker zu bauen, geschickt zu umgehen:

Der Mensch wollte und will Berge versetzen, er wollte und will schneller und höher als alle Vögel fliegen, gewandter als ein Haifisch schwimmen, helleres Licht als die Sonne erzeugen und schließlich bis zu den fernen Sternen gelangen.

Die Menschen waren und sind von einer schöpferischen Unzufriedenheit und dem Bestreben erfüllt, das für die jeweilige Zeit Unerreichbare doch zu erreichen. Wohl haben die Gelehrten bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Welt nicht wenige prinzipielle Schranken entdeckt, die solchen Bestrebungen entgegenstehen und nicht umgangen werden können.

Da sie nur objektiven Kenntnissen Bedeutung zuerkennen, bleibt für Phantasie und Romantik kein Platz. Doch auch die Wissenschaftler sind Menschen, und die Hauptrichtung ihrer Arbeit ist häufig vom Traum nach unumschränkter Macht über Stoff und Energie bestimmt.

Der Mensch hat im Laufe seiner Entwicklung eine Intelligenzstufe und einen Gedächtnisumfang wie kein anderes Lebewesen erreicht. Dadurch ist es ihm möglich, nichttriviale Folgerungen aus seiner Tätigkeit zu ziehen, sich Ziele und Aufgaben zu stellen, Kenntnisse auszutauschen, aufzuspeichern und sie bei der Auseinandersetzung mit seiner Umwelt, bei der Veränderung der Welt anzuwenden.

Jedes Lebewesen bringt einen bestimmten Anteil an Zielstrebigkeit in das Weltgeschehen, der es zur Anpassung an seine Umwelt und zur Befriedigung seiner Bedürfnisse befähigt (z. B. durch den Bau von Nestern).

Der Mensch begann Gegenstände zu erzeugen, die nicht unmittelbar seinen natürlichen Bedürfnissen, seinen biologischen Ansprüchen dienen; nämlich Gegenstände die er zur Arbeit braucht, mit deren Hilfe er Stoffumwandlungen vornimmt, die eine unmittelbare Befriedigung seiner Bedürfnisse bezwecken: Er begann, Werkzeuge herzustellen.

Unter dem Einfluss der Tatsache, dass sich unter den Lebewesen nur die Vögel und die Menschen auf zwei Beinen bewegen, definierte einst Platon den Menschen als "Zweibeiner ohne Federn". Aber der große Staatsmann und Naturforscher Benjamin Franklin trat dieser Auffassung entgegen und bezeichnete den Menschen als "werkzeugschaffendes Lebewesen".

Da der Mensch nicht die Kraft hat, größere Tiere selbst zu überwältigen, baute er an ihren Pfaden Stein stapel auf, die durch einen leichten, aber zielstrebigem Anstoß große Kräfte freisetzen.

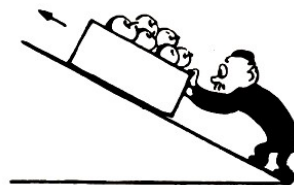


Bild 4.1.: Die erste einfache Maschine: die schiefe Ebene.

Die wichtigsten technischen Errungenschaften des Menschen gehören in die Kategorie der Verstärker. Die Muskelkraft eines Menschen allein reicht nicht aus, wenn Metalle und Hölzer bearbeitet werden sollen.

Auf Grund von Erfahrungen, die wir heute als Hookesches Gesetz - "Die Verformung ist der Kraft proportional" - formulieren, schärft der Mensch seine Werkzeuge und erreicht damit, dass der Druck - Kraft je Flächeneinheit - größer wird.

Wenn seine Kraft für eine bestimmte Tätigkeit nicht ausreicht, benutzt der Mensch kraftumformende Einrichtungen, wie Hebel, Keil, Wellrad, Schraube, Rolle. - Das alles sind Vorrichtungen,

die auf Grund einer Verlängerung des Arbeitsweges auf der einen Seite zu einer Vergrößerung der Kraft auf der anderen Seite führen. Die einfachen Werkzeuge werden in mannigfacher Weise angewendet; bei ihrem Gebrauch ist der Steuerungsprozess rein bewegungsmäßiger, energetischer Natur; er besteht in der Auswahl einer der vielen Möglichkeiten.

Die Praxis zeigt, dass die Werkzeuge bei ihrer Anwendung meist nur wenige, sich wiederholende gleichartige Bewegungen ausführen; das Werkzeug beschränkt also seine Bewegungsmöglichkeit selbst. Versieht man das Werkzeug zusätzlich mit einer Vorrichtung, die ihm nur solche Bewegungen ermöglicht, die in der Praxis tatsächlich erforderlich sind, dann wird der Steuerungsprozess vereinfacht.

Das in der Technik wichtigste Beispiel für Einrichtungen dieser Art bilden die Werkbänke. Jede Werkbank besitzt Teile, welche die Bewegungsmöglichkeiten für die Werkzeuge festlegen: Kufen und Schienen für eine geradlinige oder oszillierende Bewegung, Wellen und Lager für Drehbewegungen.

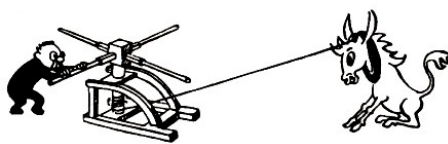


Bild 4.2.: Die Winde

Diese Teile befinden sich in einem Gestell, das im allgemeinen unbewegt bleibt. Es ist klar, dass eine handbetriebene Werkbank die Arbeit erleichtert, jedoch nur in der Hinsicht, dass die Steuerung der einzelnen Werkzeuge einfacher ist. Damit wird die Rolle, die der Mensch bei der Arbeit an dieser Werkbank spielt, in höherem Grade zu der eines Energielieferanten, als das bei der Arbeit mit einfachen Werkzeugen der Fall ist.

Ein Hauptziel der Technik musste es daher sein, eine Energiequelle zu erschließen und einen Motor zu konstruieren. Die ersten Bemühungen um die Realisierung dieses Ziels führten zu einfachen Sammlern der von menschlichen Muskeln erzeugten mechanischen Energie. Hierzu gehören der Bogen und das Schwungrad (z.B. an der Töpferscheibe).

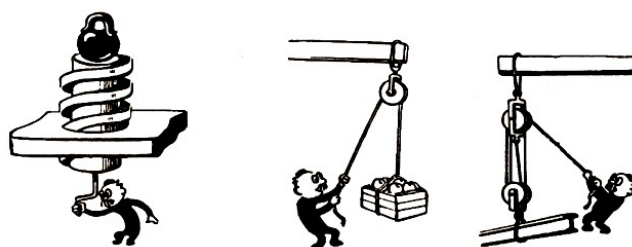


Bild 4.3.: Eine einfache Maschine - die Schraube

Bild 4.4 und 4.5: Weitere einfache Maschinen die Rolle ... und der Flaschenzug. Das sind Verstärker.

Die Konstruktion einer Armbrust ist denkbar einfach, dennoch entdecken wir alle grundlegenden Elemente einer primitiven Maschine an ihr. Sie enthält einen Energiespeicher, nämlich den Bogen (mit der Sehne), der aufgespeicherte Muskelkraft in Form eines Bewegungsimpulses an den Pfeil wieder abgibt. Die scharfe Spitze des Pfeils wirkt beim Auftreffen als Verstärker für die Stoßkraft.

Die Steuerung der Armbrust durch den Schützen besteht zum einen in dem verhältnismäßig komplizierten Prozess des Zielens, zum anderen in der Eingabe eines einfachen Signals in das System, dem Abdrücken des Abzugs.



Bild 4.6.: Die Verformung ist proportional zur angreifenden Kraft - so lehrt die Physik ...

Es versteht sich von selbst, dass sich die menschliche Tätigkeit nicht auf die genannten Entwicklungseinrichtungen der Technik beschränkt hat. Der Mensch war um den Bau seiner Wohnstatt bemüht, um die Schaffung von Transportmitteln, wie Boote und Flöße. Er strebte danach, das Leben von Pflanzen und Tieren nach seinen Bedürfnissen zu steuern; so entstanden die verschiedenen Zweige des Ackerbaus und der Tierzucht.



Bild 4.7.: Der erste auslösbare Automat - der Selbstschuss. Er trägt seine Bezeichnung sicher zu recht, denn solch schlaue Füchse gibt es nur im Märchen.

Die Grundlinie in der Entwicklung der Technik besteht jedoch seit ihren Anfängen in der Mechanisierung und Automatisierung, in der Schaffung künstlicher Signalsysteme, die als Steuerungsorgane in den Maschinen enthalten sind.

Die ersten Automaten waren die Falle und die vervollkommnete, als Selbstschuss wirkende Armbrust, die in der Nähe eines Wildwechsels fest angebracht und durch ein Signalsystem ergänzt ist - z. B. durch eine Schnur, die bei einer Berührung den Schuss auslöst.

Dieses Signalsystem besitzt eine Reizschwelle - ein Blatt, das auf die Schnur fällt, wirkt nicht als auslösendes Signal, wohl aber das Fallen eines Astes oder der Tritt eines Tieres auf die Schnur. Diese überträgt das Signal und wandelt es, wenn seine Stärke einen gewissen Betrag überschreitet, in das Kommando "Pfeil auslösen" um.

Für das Funktionieren eines Selbstschusses ist eine steuernde Tätigkeit des Menschen nur mehr mittelbar, beim Einrichten und Spannen, erforderlich. Man kann den Selbstschuss irgendwo im Dickicht aufstellen, weit ab von den Wegen der Jäger; solange er funktionstüchtig bleibt, wird er nicht nur auf das Wild schießen, sondern auch seinen Erbauer gefährden, falls dieser unvorsichtig die Schnur berühren sollte.

So wird die Fähigkeit zu aktiver, zielgerichteter Tätigkeit für unbestimmte Zeit in einem Automaten aufbewahrt.

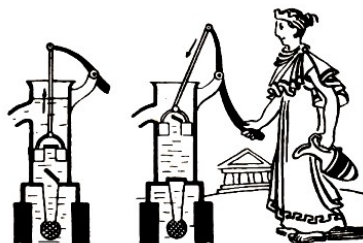


Bild 4.8.: Die selbst öffnenden und schließenden Klappen (Ventile) in der Pumpe des Ktesibios stellen bereits ein verhältnismäßig hochentwickeltes Muster eines periodischen Automaten dar, der seinen Aufbau bei seiner Tätigkeit zielgerichtet ändert.

Die primitiven auslösbaren Automaten vom Typ der Falle oder des Selbstschusses wurden zu periodischen Automaten weiterentwickelt, die, falls Energie zugeführt wird, mehrmals die gleichen - mehr oder weniger komplizierten - Programme abwickeln können.

Als Beispiel für einen solchen Automaten kann die Saugpumpe dienen, die nach der Überlieferung im zweiten Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung von Ktesibios aus Alexandria erfunden wurde.

Beim Schöpfen von Wasser mit einem Gefäß, das ein veränderliches Volumen hat - etwa durch einen beweglichen oder biegsamen Boden ist es notwendig, fünf Tätigkeiten auszuführen: 1. den Wasserzufluss in das Gefäß öffnen, 2. dessen Rauminhalt vergrößern, 3. die Verbindung des Gefäßes mit dem umgebenden Wasser unterbrechen, 4. das Gefäß anheben und den Abfluss öffnen, 5. den Rauminhalt des Gefäßes verringern.

Ktesibios hat am Gefäß Klappen (Ventile) so angeordnet, dass sie sich im richtigen Augenblick von selbst öffnen oder schließen; der Mensch braucht nur noch einen Schwengel auf- und abwärts zu bewegen; dabei übt er also lediglich die Funktion eines Motors, nicht aber die eines steuernden Systems aus.

Bei einer Pumpe bildet das Steuerungssystem keinen besonderen, selbständigen Teil, der für sich betrachtet werden kann. Das Funktionieren der Pumpe nach dem oben beschriebenen Programm wird vielmehr durch die Konstruktion in ihrer Gesamtheit gewährleistet.

Ähnlich liegen die Dinge bei der Mehrzahl der Maschinen und Mechanismen, mit denen wir zu tun haben. Bei einer Nähmaschine nähen eigentlich nur Nadel und Schiffchen, alle anderen Bauteile dienen zur Übertragung und Umwandlung der Drehbewegung des Schwungrades in die aufeinander abgestimmten Bewegungen von Nadel und Schiffchen.

In der Konstruktion von Automaten mit wesentlich komplizierteren Arbeitsprogrammen setzte sich mit der Zeit das Prinzip durch, ein Programmsteuerungssystem abzusondern. Dieses Steuerungssystem nimmt das Programm auf und steuert den Teil des Automaten, der die Verstärker enthält und die Aktionen ausführt. Beispiele für programmgesteuerte Automaten sind die Spieldose und die Drehorgel.

Eine Spieldose enthält eine Feder, die eine Walze in Drehung versetzt. Auf dieser Walze angebrachte Stifte schlagen Metallzungen an und bringen sie zum Erklingen. Durch Öffnen des Kästchens wird der Mechanismus aufgezogen und die Walze in Bewegung versetzt. Die Töne entstehen nun in der Reihenfolge, die durch die Stifte festgelegt ist. Gleichzeitig kann die Feder eine Figur im Takt zur Musik tanzen lassen.

In programmgesteuerten Automaten mit Walzen als Programmspeicher haben diese Walzen häufig eine sehr komplizierte Form, mit Erhebungen, Nocken und Rillen, auf und in denen verschiedene Hebel gleiten. Dadurch werden entsprechend komplizierte und kontinuierliche Bewegungen in den gewünschten Richtungen erreicht.

Die Idee, das Programm in einem besonderen Teil des Automaten zu fixieren, erwies sich als höchst bedeutungsvoll für die weitere technische Entwicklung solcher Maschinen. Das an einer bestimmten Stelle gespeicherte Programm kann nämlich leicht durch ein anderes ersetzt werden, in dem man die betreffenden Bauteile auswechselt. Sobald eine leichte Auswechselbarkeit dieses Programmspeichers gewährleistet ist und von diesem System im wesentlichen Befehle - also Signale -, nicht aber Energie abgegeben werden, kann man schon von einem "Gedächtnis" der Maschine sprechen - allerdings von einem passiven (in unseren Beispielen: einem mechanischen) Gedächtnis, dessen Inhalt von außen eingegeben wird.

Die Möglichkeit, die Tätigkeiten von Tieren oder Menschen durch mechanische Automaten mit einem komplizierten Programm nachzuahmen, hat bereits die Mechaniker des Altertums und deren reiche Auftraggeber interessiert.



Bild 4.9.: Die Konquistadoren waren sehr erstaunt, als sie im Palast Tenochtitlans mechanische Affen und Papageien fanden.

Als die spanischen Konquistadoren im sechzehnten Jahrhundert das Reich der Azteken in Amerika eroberten, fanden sie in den Palästen der Herrscher programmgesteuerte mechanische Automaten; goldene Papageien wendeten die Köpfe und schlugen mit den Flügeln; goldene Affen bewegten Spinnrad und Spindel oder bissen scheinbar in einen Apfel.

Schon in der Antike wurde mit mechanischen Figuren Theater gespielt; solche Figuren wurden später zu einem traditionellen Beiwerk mechanischer Prunkuhren. Im achtzehnten Jahrhundert führte die Beschäftigung mit derartigen Automaten zu den ersten praktischen Resultaten.

Die französischen Automatenmechaniker Vaucanson und Jacquard verwendeten ein System, das mit Nocken und Stiften gelochte Kartonblätter abtastet, zur Steuerung von komplizierten Automaten, insbesondere von Webstühlen, die gemusterte Stoffe herstellen. Bei diesen Webstühlen dienten die Lochkarten als Programmspeicher.

Natürlich kann ein Automat, der fest programmiert ist, nur ein einziges Webmuster fertigen und ist daher nutzlos, sobald dieses Muster aus der Mode gekommen ist.

Durch das Auswechseln der Lochkarte, das Eingeben eines neuen Arbeitsprogramms also, wird die Arbeitsweise des Automaten so geändert, dass das im Effekt dem Ersetzen dieses Automaten durch einen anderen gleichkommt.



Bild 4.10.: Verschiedene Anlagen zur Aufbewahrung komplizierter Programme (von oben nach unten): eine mit Zapfen versehene Trommel für einen Leierkasten, eine Trommel mit Kurvenstück für kinematische Führung, eine photoelektrische Vorrichtung zur Tonwiedergabe.

Damit hört die Maschine bereits auf, lediglich einfacher Verstärker oder Bewegungsumformer zu sein. Sie kann eine ganze Kollektion verhältnismäßig unterschiedlicher Maschinen ersetzen und ändert ihre Eigenschaften, sobald ihr Programm geändert wird. Die Konstruktion der Maschine bedingt den Charakter ihrer Arbeit nicht mehr eindeutig.

Kann man sagen, dass der Konstrukteur des Jacquard-Webstuhls bei der Projektierung seiner Maschine bereits alle Musterentwürfe für Gewebe vorausgesehen hat, die später gefertigt werden?

Das ist doch wohl zu verneinen. Der Konstrukteur setzt lediglich dem Charakter der Muster gewisse Grenzen, mit seiner Konstruktion legt er aber keinesfalls alle Muster vorher fest.

Alle Grammophone sind gleichartig aufgebaut, und dennoch reproduzieren sie verschiedene Musikstücke. Eine Maschine, die Löffel fertigt, kann im allgemeinen auch Gabeln herstellen, wenn man zwei Teile des Stempels, mit dem sie das Metall bearbeitet, auswechselt.

Vor kurzem wurde auf einer Moskauer Ausstellung eine Kopierfräsmaschine gezeigt. Auf einen Tisch an der Maschine stellte man eine Rose. Ein Knopf wurde gedrückt, die Maschine lief an, die Fräser drangen in einen Stahlblock ein, und nach einer Stunde war die Form der Rose in allen Einzelheiten aus dem Stahlblock säuberlich herausmodelliert.

Der Arbeiter an der Maschine drückte wieder auf einen Knopf, und die Maschine blieb stehen. Durch den Automaten hatte sich das Modellieren einer Rose für den Arbeiter auf zwei Knopfdrücke reduziert.

Die Rose, die auf dem Tisch an der Maschine stand, diente gewissermaßen als Programm für das System der Verstärker, das durch elektrische Signale von einem Fühler, der sich in geringem Abstand von der Blüte befand, gesteuert wurde.

Die ersten Kopierdrehmaschinen wurden im Jahre 1718 vom russischen Mechaniker Andrej Nartow gebaut. Lange Zeit waren die Fühler und die Verbindungen zu den Verstärkern rein mechanischer Natur. Eine Rose konnte von diesen Maschinen niemals kopiert werden; vom gewünschten Produkt mussten Holzmodelle angefertigt werden, auf deren fester Oberfläche die Fühler gleiten konnten.

Zwischen einer Kopiervorlage und einem Programm gibt es manchen Unterschied. Das Programm ist ein mathematisches Modell der Herstellung des Produkts, die Kopiervorlage dagegen ein physikalisches Modell des Produkts selbst. Beiden ist aber gemeinsam, dass sie nicht in die Konstruktion der Werkzeugmaschine selbst eingehen.

Die Programmsteuerung zweier Fräsmaschinen, von denen die eine beispielsweise Muffen, die andere Bolzen herstellt, ist heute für einen Ingenieur keine besondere Sache, sie ist einfach, leicht zu verstehen und zu realisieren.

Nimmt man aber den Standpunkt eines unbeteiligten Beobachters ein und will man die Tätigkeit der Maschinen beschreiben, so dürfte das selbst dem schärfsten Verstand einige Schwierigkeiten bereiten.

Stellen wir uns vor, dass ein solcher Beobachter die beiden Fräsmaschinen hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Produktion untersucht! Es ist klar, dass der gleiche Kausalzusammenhang nicht zu verschiedenen Resultaten - Muffen und Bolzen - führen kann. Durch einen Zufall lässt sich das auch nicht erklären, denn die eine Maschine fertigt ununterbrochen nur Muffen und die andere ununterbrochen nur Bolzen. Die Maschinen sind aber gleichartig!

Ihre vollständige Übereinstimmung kann man nicht nur am allgemeinen Bauplan, an der Form der Fräser und des Tisches, am Antrieb sowie an der Kraftübertragung und Kraftverstärkung feststellen, sondern auch am System, das die Unterschiede in der Produktion hervorruft - an der Programmanlage.

In beiden Maschinen läuft je ein dünnes, biegsames, bräunlich gefärbtes Band zwischen zwei Spulen, und wenn wir dessen magnetische Eigenschaften untersuchten, so zeigt sich auch hierin scheinbar kein wesentlicher Unterschied: das Band ist jeweils an verschiedenen Stellen



schwächer und an anderen Stellen stärker magnetisiert.

Wer nimmt schon an, dass geringe Unterschiede in der Magnetisierung - solche Unterschiede kann man wahrscheinlich auch an vielen anderen Stellen der Maschine auffinden - maßgebend für den Charakter der Produktion der ganzen Maschine sind?

Wir können uns vorstellen, was für sonderbare Gedanken solche Maschinen bei Menschen auslösen würden, die derartige Maschinen selbst nicht gebaut haben und nun bei ihren Ausgrabungen einige Exemplare - als Überreste einer untergegangenen höheren Zivilisationsstufe - vorfänden und in Betrieb nähmen!

Einige dieser Menschen würden möglicherweise behaupten, dass die Muffen oder Bolzen in den Maschinen im Verborgenen "angelegt" seien und sich nun ausbildeten. Andere wiederum könnten das bestreiten, indem sie nachzuweisen versuchten, dass es in den Maschinen keine strukturellen Bildungen gibt, welche die Produktion bestimmen. Schließlich gäbe es große Verwirrung.

Die Universalität und die Originalität der Ergebnisse, die bei der Programmierung von Maschinen erhalten werden, führten dazu, dass in der Zeit, als die Begeisterung für programmgesteuerte Figuren ihren Höhepunkt erreicht hatte, der Philosoph und Mathematiker Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) ein ganzes Weltsystem auf das Prinzip der Programmsteuerung gründete.

Damals wurden viele Spekulationen über den Zusammenhang von Körper und Seele angestellt. Der Holländer Geulincx behauptete, dass Körper und Seele völlig getrennt existieren, gleichzeitig aber so zusammenwirken wie zwei Uhrwerke, die genau nach dem gleichen Programm arbeiten.

Leibniz nahm an, indem er diesen Gedanken weiterentwickelte, dass die ganze Welt aus programmierten Elementen, den "Monaden", bestehe, die "keine Fenster" haben, aber alle harmonisch zusammenwirken, da ihre Programme aufeinander abgestimmt sind.

Für den Programmierer aller Monaden hielt Leibniz Gott. Aber schon bei ihrer Entstehung wurde die Monadenlehre kaum verstanden, und später rückte die Wissenschaft vollständig von ihr ab. Jedoch entstand in unserer Zeit unter Erfindern und Ingenieuren - besonders jedoch unter Mathematikern - eine "Monadenlehre" neuer Art, eine neue Einschätzung der Möglichkeiten, welche die Programmsteuerung bietet. Die Programmsteuerung erweist sich zwar nicht als das allgemeinste, aber in gewisser Weise als ein vollständiges Prinzip der automatischen Steuerung.

Die Mathematiker und die Vertreter der theoretischen Physik waren bei all ihrem Scharfsinn und ihrer Gewandtheit in abstrakten Operationen manchmal hoffnungslos schlechte Ingenieure. Gleich einem Don Quichote lebten sie oft nicht in unserer vielgestaltig pulsierenden Welt, sondern in einem Elfenbeinturm der höheren Strukturen und Ideale.

Einer dieser Theoretiker trug sich vor einigen Jahren mit dem Plan, die Menschen in der Produktion durch automatisch arbeitende Puppen zu ersetzen. Die Programme für diese Puppen sollten aus den Aufzeichnungen über die Tätigkeit und das Verhalten arbeitender Menschen entsprechender Spezialausbildung und Qualifikation gewonnen werden.

"Stellen Sie sich vor", so sprach dieser Theoretiker, "dass Sie morgens früh beim Aufstehen einen Tornister mit einem Tonbandgerät vorfinden, auf dem alle Ihre Bewegungen aufgezeichnet werden; wie Sie zur U-Bahn gehen, den Betrieb betreten, Ihre Kontrollmarke aufhängen, zu Ihrer Maschine gehen, sie einschalten, und wie Sie während Ihrer Schicht arbeiten. Am Tage darauf legen Sie das Band in eine automatische Puppe ein, und diese wird nun tagsüber genau

das gleiche tun wie Sie, sie wird Ihre Tätigkeiten und Ihr Verhalten haargenau wiederholen ..."

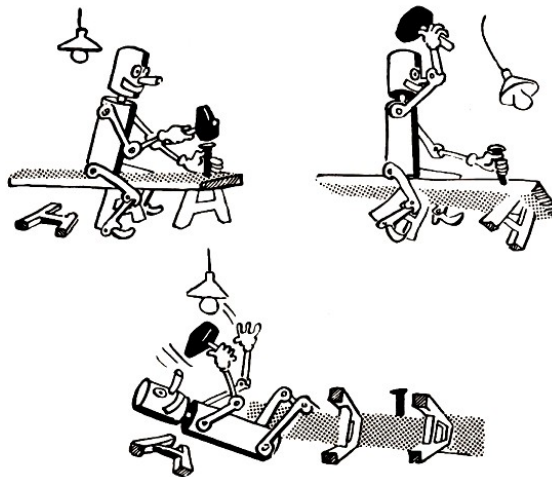


Bild 4.11.: Eine vollständig programmierte Maschine ist nicht in der Lage, längere Zeit zielstrebig in unserer sich verändernden Welt zu wirken.

Nehmen wir einmal an, wir könnten eine Puppe dieser Art konstruieren und bauen. Ich würde aber vorher den Erfinder beauftragen, "Puppe zu spielen" und als solche mit geschlossenen Augen mehrmals folgende einfache Tätigkeit auszuführen: drei Schritte bis zu einem Tisch zu gehen, dort einen Briefbeschwerer aufzuheben, mit diesem Briefbeschwerer drei Schritte vom Tisch wegzugehen, von neuem zum Tisch zu gehen, den Briefbeschwerer hinzustellen und drei Schritte vom Tisch wegzugehen.

Beim zweiten Versuch wird das verwirrte "Modell" zunächst ins Leere greifen und mit den Fingern zu tasten beginnen; der Briefbeschwerer steht nicht dort, wo es ihn erwartet hat, sondern vielleicht etwas seitlich.

"Beim ersten Mal haben Sie nicht umhergetastet", werde ich sagen. "Und als 'Puppe' wissen Sie ja gar nicht, ob Sie nach einem Gegenstand greifen oder ins Leere. Sie führen Ihre Bewegungen aus, ohne zu denken und ohne sich selbst zu kontrollieren."

Es wäre ganz vergnüglich anzusehen, wie dieser Mensch, der den Briefbeschwerer verfehlt hat, zum Tisch geht, Luft ergreift, wieder weggeht ...

Wenn ihm dabei das Tintenfass unter die Hände käme, würde man den Versuch wohl aus begrifflichen Gründen abbrechen.

In einer ideal unbewegten Welt wäre es möglich, dass eine blinde und taube programmgesteuerte Puppe bestimmte Arbeiten gut ausführen könnte. Aber unter den wirklichen Bedingungen auf unserer Erde würde eine solche Puppe nichts taugen. Es genügte, dass sie auf ihrem Wege zur Arbeit in eine Pfütze träte, die am Vortage noch nicht vorhanden war; dadurch käme sie vom Wege ab - und alles wäre vorbei!

Bei jedem Schritt kann sich ein winziger Fehler in der Steuerung einstellen. Die Puppe braucht nur, wenn sie an einer Wand entlang geht, die Tür zu verfehlen; sie stößt gegen die Wand, fällt auf den Fußboden und bewegt dort ihre Arme und Beine bis zum Abend.

In dieser Stellung führt sie nun genau alle Bewegungen und Handgriffe wie bei der Arbeit an der Maschine aus, getreu ihrem Programm - nur sind alle diese Tätigkeiten nunmehr in keiner Weise zweckvoll und zielgerichtet. Wir haben es jetzt eigentlich gar nicht mehr mit einem Automaten zu tun, sondern mit einem elektromagnetischen System ohne eine besondere, durch einen kybernetischen Vorgang bedingte Funktion.

Eine Anwendung der beschriebenen Programmsteuerung in der Produktion erfordert, die Materialeigenschaften zu vereinheitlichen, beim Bau der Maschinen höchste Genauigkeit einzuhalten und die Arbeitsbedingungen exakt festzulegen. Aber selbst wenn diese hohen Forderungen erfüllt wären, müsste der Mensch die Maschine ständig beaufsichtigen und dürfte sich nicht von ihr entfernen. Er müsste unablässig jede einzelne Tätigkeit der Maschine kontrollieren, andernfalls könnte Ausschuss entstehen. Kurz, eine reine Programmsteuerung ist in der Praxis nur selten anwendbar.

Man darf nicht glauben, "dass die Spieldose ein typisches Beispiel für jedes Maschinenverhalten wäre, im Gegensatz zu jedem Verhalten lebender Organismen", sagte Norbert Wiener einmal.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup>N. Wiener; Mensch und Menschmaschine. (The human use of human beings). Athenäum-Verlag. Frankfurt a. M. 1964. Seite 21.

## 5 Die Rückkopplung, die Grundlage des Automatismus in Natur und Technik



Eine allgemeine Eigenschaft: Widerspiegelungsfähigkeit - Kettenreaktionen: Explosion und Erlöschen - Die Flamme - ein System mit Regelung; der Fluss, ein System mit verzögerter Regelung - Der Mensch als Regler - Das gleiche System, aber ohne den Menschen - Mehrere Rückkopplungen - Woher stammt das Programm? - Das Kriterium schützt nicht vor Betrug - Das Rauschen, ein Maler, ein Poet und ein Musikant - Höhere Mathematik tritt in Erscheinung - Die Extremalregelung - wie soll die Auswahl getroffen werden?

Unter der Vielzahl der Einwirkungen, die ein jedes System durch seine Umgebung erfährt, erregt besonders eine das prinzipielle Interesse der Wissenschaft von der Steuerung und Regelung, der Kybernetik, und zwar jene Einwirkung, die von der Widerspiegelung ausgeht, die das System in seiner Umgebung hervorruft. In der Regel besteht zwischen einem System und seiner Umgebung nicht nur eine einseitige Beziehung.

Das System wirkt nämlich nicht nur auf die Umgebung, sondern steht auch selbst unter deren Einfluss. Verändert sich die Umgebung durch die Einwirkung des Systems, so verändert sich damit natürlich auch der Einfluss der Umgebung auf das System und eventuell das System selbst.

Eine solche Einwirkung eines Systems auf sich selbst nennen wir Rückwirkung; wenn diese Rückwirkung durch eine bestimmte Struktur, eine bestimmte Kopplung zwischen dem System und seiner Umgebung hervorgerufen wird, heißt sie Rückkopplung.

Alle Prozesse und Erscheinungen in der Natur sind auf irgendeine Weise gewissen Rückwirkungen unterworfen. Aber in der Mehrzahl der Fälle spielen diese Wirkungen nur eine untergeordnete Rolle, so dass sie kaum bemerkt werden.

Doch wenn bei einem Prozess eine "unerklärliche" Verstärkung, Abschwächung oder Stabilisierung auftritt, so spielen die Rückwirkungen dabei oft eine entscheidende Rolle. Sie unberücksichtigt zu lassen, hieße das Wesen des Prozesses zu verkennen. In abgeschlossenen physikalischen Systemen können die Rückwirkungen zwei verschiedene Richtungen haben.

Bekanntlich ist Schießpulver ein Stoff, der bei seiner Verbrennung den hierfür notwendigen Sauerstoff selbst freisetzt. Für jeden brennenden Stoff gilt: je mehr Sauerstoff, desto intensiver die Verbrennung. Je mehr Schießpulver verbrennt, desto mehr Sauerstoff steht für die Verbrennung von Schießpulver zur Verfügung, desto intensiver schreitet der Verbrennungsprozess fort.

Das Ablaufen des Prozesses fördert somit den Prozess, es bewirkt seine Beschleunigung. Wir sprechen in diesem Fall von einer positiven Rückwirkung des Prozesses auf sich selbst und beobachten eine sich rasch ausbreitende Kettenreaktion, eine Explosion.

Gültig ist aber auch der Satz: je weniger Sauerstoff, desto schwächer die Verbrennung. Ein

normaler brennbarer Stoff - z.B. Kohle - verbraucht, wenn er in einem geschlossenen Raum abbrennt, den dort vorhandenen Sauerstoff. Reicht dieser zu einer vollständigen Verbrennung nicht aus, so geht das Brennen zunächst in ein Glimmen über, und schließlich erlischt das Feuer.

Wodurch wird die Intensität des Prozesses beeinflusst? Durch den Prozess selbst, der hier eine negative Rückwirkung auf seine Intensität ausübt.

Wird durch eine Kopplung des Prozesses mit seiner Umwelt eine positive Rückwirkung, die also den Prozess fördert, übertragen, so sprechen wir von einer positiven Rückkopplung, führt die Rückwirkung aber zum Erlöschen des Prozesses, so liegt eine negative Rückkopplung vor.

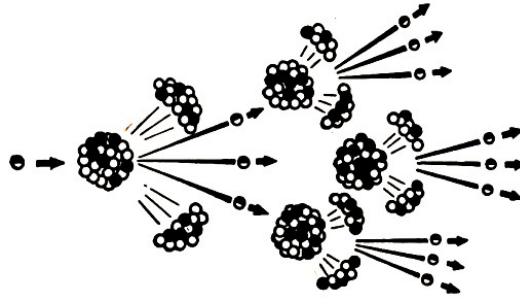


Bild 5.1.: Eine positive Rückwirkung, z.B. bei der Kettenreaktion einer Kernspaltung, führt zu einem lawinenartigen Anwachsen des Prozesses.

Offensichtlich kann eine positive Rückkopplung nicht unbeschränkt wirken, ohne zu einer Explosion zu führen, die das System zerstört. Bei einem System, das sich in einem instabilen Zustand befindet, klingt die Wirkung einer negativen Rückkopplung nach einer gewissen Zeit in dem Maße ab; in dem das System in einen stabilen Zustand übergeht.

Systeme, deren "Schicksal" von einer der beiden Grundtypen der Rückkopplung allein abhängt, sind auslösbare Systeme. Wenn wir eine detonierende Pulverladung oder ein erlöschendes Feuer im Ofen beobachten, so sind wir davon überzeugt, dass in diese Systeme irgendein Signal von außen eingegeben wurde, das diese Prozesse auslöste, d.h. diese Systeme veranlasste, von einem weniger wahrscheinlichen, wenn auch relativ stabilen Zustand in einen Zustand höherer Wahrscheinlichkeit, höherer Stabilität, überzugehen.

Dabei vergrößert sich die Entropie der betreffenden Systeme. Diese Systeme sind gegenüber Stoff und Energie abgeschlossen, doch offen in Bezug auf die Steuerung.

Manchmal können Rückwirkungen entgegengesetzter Richtungen gleichzeitig oder nacheinander auftreten und zusammenwirken. Nur mit Hilfe mehrerer derart gegeneinanderwirkender Rückkopplungen kann ein dynamisches System, das gegenüber Stoff und Energie offen, in Bezug auf Steuerungsvorgänge aber abgeschlossen ist, in einem Gleichgewichtszustand gehalten werden.

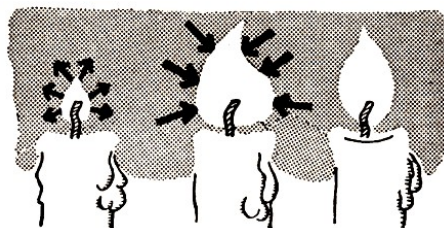


Bild 5.2.: Die Flamme ist eine Explosion eines brennbaren Stoffes, die mit Hilfe einer negativen Rückkopplung in bestimmten Grenzen gehalten wird.

Ein System dieser Art ist beispielsweise die Kerzenflamme. Eine Flamme lässt sich zwar kaum ebenso eindeutig als "Gegenstand" bezeichnen wie etwa ein Stein oder ein Tisch, aber sie ist eine relativ stabile dynamische Erscheinung. Wenn man gegen eine Flamme bläst, so setzt sie dem Luftstrom einen "Widerstand" entgegen. Bei der Flamme ist dann eine positive, die Verbrennung fördernde Rückwirkung zu beobachten. Das Stearin kann sich nur dann in Dämpfe verwandeln und seine Atome können sich nur dann mit dem Sauerstoff verbinden, wenn eine verhältnismäßig hohe Temperatur herrscht.

Anderenfalls würde nämlich die Kerze verbrennen, sobald sie mit der Luft in Berührung kommt. Die erforderliche hohe Temperatur wird durch den Oxydationsprozess des Stearins in der Flamme selbst gewonnen. Gäbe es aber nur diese positive Rückwirkung, so wäre zu erwarten, dass die Temperatur desto höher stiege, je mehr Atome oxydieren, und je mehr Atome oxydierten, desto höher stiege die Temperatur.

Warum aber explodiert die Kerze nicht? Weil in dem Maße, wie sich die Flamme vergrößert, auch ihre Wärmeabgabe anwächst und die Fähigkeit des Dochtes, flüssiges Stearin dem Verdampfen zuzuführen, beschränkt ist. Eine gewisse Zeit nach dem Entzünden erreicht die Kerzenflamme einen stabilen Zustand und behält ihn dann bei.

Vergrößert sich die Flamme, so steigt die Wärmeabgabe, und die Temperatur sinkt unter jenes Niveau ab, bei dem die Stearindämpfe oxydieren. Das ist die negative Rückwirkung der Flammenvergrößerung. Die Flamme verkleinert sich wieder.

Das Verhalten einer Kerzenflamme ähnelt in gewisser Weise dem eines lebenden Organismus. Bei ihr zeigen sich Eigenschaften, die für alle Automaten kennzeichnend sind. Ihre Existenz ist an Stoff- und Energieaustausch gebunden, die Flamme nimmt Sauerstoff und Stearindämpfe auf und scheidet Verbrennungsprodukte - Wasser, Kohlendioxid u.a. - aus.

Sie verwandelt aktive chemische Energie in Wärme und Licht. Eine Flamme vergrößert die Entropie des Systems Luft-Stearin, doch ihre eigene Entropie wird dabei weder größer noch kleiner; nach jeder zufälligen Vergrößerung oder Verkleinerung stellt sich der frühere Wert wieder ein. Die Ursache für diese Stabilität ist darin zu suchen, dass zwei einander entgegengesetzte Rückwirkungen zusammenspielen.

Am Beispiel der Flamme lassen sich begrifflicher Weise nicht alle Möglichkeiten des Zusammenspiels von Rückwirkungen darstellen. Deshalb betrachten wir noch einen anderen Fall.

Stellen wir uns einen idealisierten Fluss vor, dessen Wasser gänzlich aus Niederschlägen im Quellgebiet stammt und der in seinem Unterlauf vollständig verdunstet und in Form von Wolken zum Quellgebiet zurückkehrt.

Die Wärmestrahlung und der Wind bewirken, dass das Wasser aus dem Fluss verdunstet. Je stärker die Verdunstung, desto größer ist die Luftfeuchtigkeit und desto häufiger regnet es im Quellgebiet des Flusses; dadurch wird der Wasserzustrom vermehrt und der Wasserverlust, der durch die Verdunstung entstanden ist, ausgeglichen.

Unter bestimmten Bedingungen kann dieser idealisierte Fluss jedoch in periodische Schwingungen, d.h. in einen periodischen Wechsel seines Wasserstandes, geraten. Wir nehmen an, dass infolge äußerer Ursachen an einem bestimmten Tage die Verdunstung stärker als normal ist. Das bringt den Fluss aus seinem Gleichgewichtszustand, d.h., seine Wasserführung wird geringer. Infolge der stärkeren Verdunstung bilden sich größere Wolken, diese ziehen zum Quellgebiet und verwandeln sich dort in Regen.

Der Fluss erhält dadurch eine überdurchschnittliche Wassermenge; sie strömt flussabwärts der

Verdunstung im Unterlauf entgegen. Die größere Wassermenge bewirkt, dass sich die Verdunstung nun entsprechend erhöht und erneut größere Wolken zum Quellgebiet ziehen.



Bild 5.3.: Ein idealisierter Fluss, bei dem das Wasser nur im Unterlauf verdunstet und nur im Quellgebiet als Regen fällt, ist ein Beispiel für ein System mit verzögerter Rückwirkung.

Das System Fluss-Wolke reagiert ebenso, wenn Nebenfaktoren in den Ablauf des Prozesses eingreifen. Wenn beispielsweise Wolken durch den Wind aus einem Nachbargebiet ins Quellgebiet des Flusses getrieben werden, so entsteht eine ähnliche Störung des Gleichgewichts. In den hohen und niederen Wasserständen des Flusses spiegelt sich in Zukunft das Resultat der genannten einmaligen Einwirkung wider.

Mit anderen Worten, eine verzögerte Rückkopplung in einem in Bezug auf Steuerungsvorgänge abgeschlossenen System erzeugt in diesem System ein "Gedächtnis", d.h. die Eigenschaft, den Eindruck äußerer Einflüsse für eine gewisse Zeit aufzubewahren.

Dieselbe verhältnismäßig einfache Erscheinung - das Auftreten von Rückwirkungen - kann also nicht nur Verstärkung, Abschwächung oder Stabilität eines Prozesses, sondern auch "freie", schwingungsartige Veränderungen bedingen. Solche Veränderungen bilden Widerspiegelungen äußerer Ereignisse und den Ausdruck einer gewissen Selbständigkeit in energetischer Hinsicht. Ursächlich strömt der Fluss deshalb, weil die Sonne scheint und das Wasser verdampfen lässt. Bei Nacht scheint die Sonne nicht, aber der Fluss strömt dennoch! Zwar verdunstet auch nachts Wasser, weil Wind weht, aber diese Verdunstung ist wesentlich schwächer als bei Sonnenschein.

Am Wasserstand des Flusses sind diese Unterschiede in der Verdunstung aber nicht sofort zu bemerken. Der Fluss enthält so viel Wasser, dass er nicht sofort versiegt, wenn der Regen ausbleibt. Jede Veränderung verzögert sich, deshalb verstärkt oder verringert sich der Wasserstrom nicht sofort nach dem Eintreten des Ereignisses, das die Änderung hervorruft.

Es gibt zwei Arten von Systemen mit Rückwirkungen: Bei der ersten Art treten die Rückwirkungen unmittelbar ohne Verzögerungen auf, bei der zweiten erscheinen sie mit Verzögerung und werden nicht sofort, sondern erst nach Ablauf einer gewissen Zeit bemerkbar.

Welchen Effekt Rückwirkungen verschiedener Arten und Richtungen in einem gegebenen System haben, ist mitunter schwer vorauszusehen. Bisweilen beobachtet man, dass eine Richtung der Rückwirkungen sozusagen die Oberhand gewinnt, d.h. das System im wesentlichen ihrem Einfluss unterwirft, öfter jedoch schwingt das System unter dem Einfluss verschiedener Rückwirkungen zwischen Verstärkung und Abschwächung der in ihm ablaufenden Prozesse hin und her.

Rückwirkungen bilden die Grundlage der Automatismen sowohl in der unbelebten Natur als

auch - und hier in besonderem Maße - im Bereich der lebenden Organismen und der künstlichen Automaten.

Betrachten wir eine sehr dünne Scheibe aus Uran 235, deren Masse 1 Kilogramm beträgt. In jedem Moment zerfallen in dieser Scheibe einige Atome Uran 235. Bei jedem derartigen Zerfall entstehen drei sogenannte schnelle Neutronen, deren Geschwindigkeit ausreicht, um in den Kern eines anderen Uran-235-Atoms einzudringen und ihn zu spalten, wobei dann abermals drei Neutronen mit dieser Eigenschaft frei werden.

Die Ausstrahlung der Neutronen erfolgt in alle Richtungen des Raumes mit der gleichen Wahrscheinlichkeit. Da unser Uran die Form einer sehr dünnen Scheibe hat, verlässt die überwältigende Mehrheit der beim Atomzerfall entstehenden Neutronen diese Scheibe und verschwindet in die Umgebung, ohne ein Uranatom zu spalten - es kommt zu keiner Kettenreaktion, weil die Kette "Atomspaltung-Neutronen-Atomspaltung" durch das Entweichen der Neutronen unterbrochen wird.

Wir beobachten hier eine negative Rückwirkung der Umgebung auf das System - die Umgebung "verschluckt" die Neutronen und hemmt dadurch den Atomzerfall. Der neutronenabsorbierende Einfluss der Umgebung unseres Uranstückes verringert sich, wenn die Oberfläche des Uranstückes verkleinert wird.

Formen wir aus demselben Uran eine Kugel, so gewinnt die positive Rückwirkung des Atomspaltungsprozesses auf sich selbst die Oberhand, diese Rückwirkung - nämlich das Ausstrahlen schneller Neutronen beim Atomzerfall - führt jetzt zu einem lawinenartigen Anwachsen der Neutronenzahl und der getroffenen Uranatome, und damit - durch die frei werdende Energie - zu einer Atomexplosion.

Lässt sich dieser Prozess nicht beherrschen?

Lässt sich die Atomflamme nicht zähmen wie die Kerzenflamme? Was ist dazu zu tun?

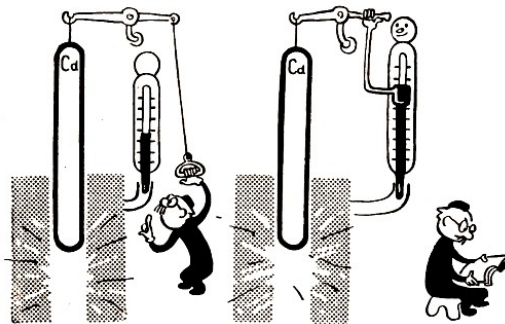


Bild 5.4.: Ein Wärter ist beauftragt, den Atomreaktor so zu regeln, dass keine Explosion eintritt. Eine solche Regelung lässt sich aber mittels einer Rückkopplung durchführen.

Dazu muss man das Gleichgewicht zwischen der negativen Rückwirkung der Umgebung auf den Prozess und der positiven Rückwirkung des Prozesses auf sich, das sich bei der Kerzenflamme selbst einstellt, künstlich herstellen. Das heißt, man muss dafür sorgen, dass ein bestimmtes Verhältnis zwischen der Anzahl der neu entstehenden Neutronen und der Anzahl der Neutronen, die das Uranstück verlassen und keine Atomkerne mehr spalten, eingehalten wird.

Dazu umgeben wir das Uran mit einem (die Neutronen abbremsenden) Graphitmantel, in dem senkrechte Röhren ausgespart sind, durch die man Stäbe aus einem neutronenabsorbierenden Stoff, z.B. Kadmium, in das Innere einführen kann. Das Kadmium absorbiert Neutronen; werden die Stäbe zur Hälfte eingeschoben, klingt die Reaktion ab, werden sie entfernt, erfolgt eine Explosion.



Die Stellung der Stäbe steuert die Atomspaltung. Um den Spaltungsprozess durch eine negative Rückkopplung zu regeln, müssen wir mit Hilfe einer Messvorrichtung die Neutronendichte im System messen und einen Wärter einstellen, der die Stäbe bewegt.

Die Rückkopplung - und damit die gesamte Regelung - wird geschlossen durch ein letztes Element: die Instruktion. "Wenn die Anzahl der Neutronen über die Norm steigt, dann sind die Stäbe zu senken, wenn sie unter die Norm absinkt, so müssen die Stäbe gehoben werden", tragen wir dem Wärter auf.

Wir erhalten so ein automatisches System, in dem der Wärter als ein Teil, als ein Kettenglied in Erscheinung tritt. Doch der Wärter ist nicht nur ein "Kettenglied", sondern auch ein Mensch. Einmal wird er dieser eintönigen - und auch gefährlichen! - Arbeit überdrüssig sein.

Mit Hilfe irgendeines Verstärkers verbindet er dann den Zeiger des Messinstrumentes mit dem Hebel zur Bewegung der Stäbe in einer seiner Instruktion entsprechenden Weise und entfernt sich. Die Rückkopplung wird nun über eine technische Vorrichtung geschlossen, doch ihre Funktion bleibt erhalten, sie gewährleistet einen geordneten Prozessablauf ohne Rücksicht auf zufällige Erscheinungen, die beim Fehlen einer Regelung den gewünschten Ablauf stören.

Damit haben wir das Muster eines Systems mit automatischer Regelung, eines sogenannten Regelkreises, vor uns. Solche Systeme sind in den verschiedensten Gebieten der Technik weit verbreitet. Dabei handelt es sich insbesondere darum, jene Steuerungen zu automatisieren, die die Maschinen vor Beschädigungen schützen und ihre Störanfälligkeit verringern. Diese Steuerungen werden über Rückkopplungen von den Maschinen selbst übernommen, die Systeme werden dadurch gegenüber menschlichen Eingriffen zur Vermeidung von Störungen und Havarien abgeschlossen.

Viele denken, dass ein bewegtes Fahrrad allein infolge seiner physikalischen Trägheit stabil ist. In Wirklichkeit wirkt aber eine Rückkopplung, die zwischen dem Radfahrer und dem Fahrrad besteht; die Bewegung des Rades wirkt dabei als Verstärker.

Wenn der Radfahrer merkt, dass die Projektion des Schwerpunkts aus der schmalen Spur gerät, d.h. das Rad zu fallen beginnt, dann führt er mit der Lenkstange eine leichte Bewegung aus, die das Rad nach jener Seite hin steuert, auf der sich die Projektion des Schwerpunkts befindet. Die Trägheitskräfte wirken dem entgegen, und die stabile Lage des Fahrrades wird wiederhergestellt.

Je größer und komplizierter die Maschinen wurden, desto mehr wuchs das Streben des Menschen, sie auf eine möglichst einfache und wirksame Weise zu steuern. Er richtete Steuerpulte ein, von denen ständig alle Parameter der Maschine ablesbar und beeinflussbar sind, um unnütze Wege zu vermeiden und zu verhindern, dass beim Hantieren mit Bedienungselementen im Inneren der Maschine folgenschwere Unfälle passieren.

Zwischen dem Steuerpult und der Maschine bestehen einerseits Verbindungen (Kanäle), die die steuernden Signale an die Maschine weiterleiten, und andererseits Kanäle, die die Meldungen von Messinstrumenten über in der Maschine ablaufende Prozesse auf das Steuerpult übertragen.

Am Fahrersitz eines Kraftwagens finden sich beispielsweise folgende Ausgangspunkte von Kanälen, die Befehle weiterleiten: das Bremspedal, das die Bremsen an den vier Rädern steuert, ein Pedal zur Steuerung der Zufuhr des Kraftstoff-Luft-Gemisches vom Vergaser zu den Zylindern, der Starterknopf, Knöpfe für die Einstellung des Zündautomaten, für die Hupe und die Beleuchtung, Einrichtungen zur Lenkung der Vorderräder und zur Bedienung des Getriebes.

Zum Teil sind das einfache Hebel, die durch Stangen oder Seile ihre Stellung weitermelden, zum Teil sind die Befehlsgeber (Knöpfe oder Hebel) durch elektrische Leitungen mit den Effektoren, den elektromagnetischen Vorrichtungen, die die Befehle ausführen, verbunden.

Die Kontrollkanäle führen zu Signalgebern, die auf dem Armaturenbrett im Blickfeld des Kraftfahrers konzentriert sind. Verbindungen führen vom Schwimmer im Brennstofftank zum Anzeiger des Benzinstandes, von der Haupttriebewelle zum Anzeiger der Geschwindigkeit (dem Tachometer). Andere Vorrichtungen zur Kontrolle des Fahrzeugzustandes ermöglichen dem Fahrer, die Kühlwassertemperatur, den Ölstand und die Öltemperatur, den Stromfluss in den verschiedenen Teilen der elektrischen Anlage (z.B. der Zündung und der Beleuchtung) abzulesen.

Jeder erfahrene Kraftfahrer überprüft fortwährend die Wirkung der Signale, die er der Maschine gegeben hat. Aufmerksam verfolgt er die äußeren Umstände seiner Fahrt und richtet sich nach den allgemeinen Erfordernissen seines Programms, das heißt nach dem Fahrziel und nach der angestrebten Geschwindigkeit.

Das Signalsystem des Kraftfahrers bildet dabei eine Erweiterung des unvollständigen Signalsystems der Maschine; es schließt dieses System ab.

Das erfolgt durch eine Reihe von Signalen, bei denen Zeiger und Skalen, der Gesichts- und Gehörsinn, Nerven und Muskelbewegungen der Extremitäten, verschiedenartige Handgriffe, Knöpfe und Pedale zusammenspielen.



Bild 5.5.: Die Wege der Befehle und der Nachrichten die zum Fahrersitz eines Kraftwagens führen bzw. von diesem ausgehen.

Es ist keineswegs unwahrscheinlich, dass es der Technik im Laufe der Zeit gelingen wird, ohne diese Zwischenglieder auszukommen, d. h. die Signale unmittelbar dem Gehirn zuzuleiten und unmittelbar vom Gehirn aus den ausführenden Organen der Maschine die Befehle zuzuführen. Dann werden die Lenkung und das Gaspedal nicht mehr mit den Händen und Füßen bedient, sondern durch die gleichen Signale, die alle Bewegungen des menschlichen Körpers regeln. Im folgenden werden wir sehen, dass von sowjetischen Ingenieuren bereits erste und wichtige Schritte auf diesem Wege gemacht wurden.

Jedoch sind manche Signalumwandlungen so einfach, dass man zu ihrer Realisierung keine so komplizierten Naturgebilde wie das Gehirn braucht. Es genügt vielmehr häufig eine relativ einfache technische Vorrichtung, ein Regler, der die umlaufenden Nachrichten über den Zustand des Systems in entsprechende Befehle umwandelt.

Damit erhalten wir ein Regelungssystem.

Die Hauptaufgabe der Regler in der Maschine besteht darin, den Arbeitsprozess bei zufälligen Veränderungen der äußeren Bedingungen stabil zu erhalten, sein ungestörtes Ablaufen zu garantieren.

Die in eine Maschine eingegebenen Rohstoffe sind nicht selten in ihren Eigenschaften inkonstant (metallische Werkstücke gleicher Art können in ihrer Härte und Zähigkeit verschieden sein, ebenso können ihre Abmessungen im Rahmen der technologisch zulässigen Toleranzen schwanken usw.). Deshalb muss die Maschine Regler enthalten, die die für die Bearbeitung

erforderliche Kraft den Materialeigenschaften entsprechend variieren.

Auch die Temperatur in der Werkhalle, der Druck in den pneumatischen Systemen, Spannung und Stromstärke in den elektrischen Anlagen (z.B. für die Speisung der Motoren) sind inkonstant. Jede Abweichung von den Normwerten des Arbeitsregimes kann durch den Einbau bestimmter Regelungsorgane innerhalb gewünschter Grenzen gehalten werden. Das geschieht dann unabhängig von den Einwirkungen des Menschen auf die Maschine; die Regler erleichtern so seine Arbeit und steigern die Qualität der Produkte.

Eines der ältesten Systeme mit einer Rückkopplung (bzw. mit einem Regler) wird in dem Buch "Verschiedene komplizierte Maschinen" des italienischen Ingenieurs Ramelli aus dem Jahre 1588 beschrieben.

Es handelt sich dabei um eine Mühle, die je nach der Härte der Körner dem Mahlstein ein kleineres oder größeres Quantum je Zeiteinheit zuführt. Zwischen der Härte der Körner und der Bewegungsgeschwindigkeit der Mahlsteine besteht ein unmittelbarer Zusammenhang; je größer die Härte, desto größer die Reibung, desto geringer die Geschwindigkeit.

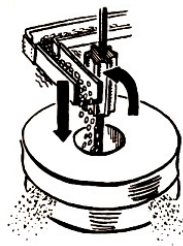


Bild 5.6.: Der Mühlenhüpfer Ramellis, der älteste bekannte automatische Regler.

Der unbekannt Konstrukteur dieses alten Regelungssystems hat auf der Welle des Mahlsteins eine Muffe angebracht, die die Rinne, durch die das Getreide in das Mahlwerk fließt, zum Schütteln bringt ("Mühlenhüpfer"). Je rascher der Mahlstein rotiert, desto kräftiger wird die Rinne geschüttelt, und desto mehr Getreide fällt in das Mahlwerk. Wenn das Getreide hart ist, so bremst es die Bewegung des Mahlsteins, dadurch wird die Rinne nicht mehr so kräftig geschüttelt, und es wird weniger Getreide zugeführt.

Im Jahre 1765 baute Iwan Polsunow eine Vorrichtung zur automatischen Regelung des Wasserstandes im Kessel einer Dampfmaschine. Er verband einen Schwimmer so mit der Wasserzuführung, dass bei fallendem Wasserstand der Hahn geöffnet und bei steigendem Wasserstand geschlossen wurde.

Seinen vollen Wert bekam das Rückkopplungsprinzip aber erst beim Bau universeller Kraftmaschinen - der Dampfmaschine, des Verbrennungsmotors und des Elektromotors (für Gleichstrom).

Es wird berichtet, dass ein Junge namens Humphrey Potter den Gedanken hatte, bei der Newcomenschen Maschine zur Steuerung von Wasser und Dampf eine Rückkopplung anzubringen. Diese Maschine bestand aus einem Dampfkessel und einem Zylinder mit Kolben. Der Kolben wurde durch den Druck des Dampfes, der in dem Kessel erzeugt wurde, angehoben.

Danach wurde die Dampfzufuhr geschlossen und kaltes Wasser in den Zylinder gespritzt, der Dampf kondensierte, und der atmosphärische Luftdruck bewegte den Kolben wieder nach unten.

Potter, der erkannt hatte, dass das Öffnen und Schließen von Dampfzufuhr und Wasserhahn im Takt der Kolbenbewegung erfolgen muss, verband die Hähne in geeigneter Weise mit dem Gestänge der Maschine, und diese steuerte sich nun selbst.

In der Folgezeit, nachdem die Verbrennungsmotoren erfunden waren, erhöhte sich die Anzahl der Rückkopplungen in den Maschinen. Nicht nur die Zufuhr des Kraftstoff-Luft-Gemisches und das Mischungsverhältnis, sondern auch die Zündung des Gemisches im Kolben durch einen elektrischen Funken wird geregelt.

Nur die Verwendung einer Rückkopplung ermöglicht es, einen Gleichstrom-Elektromotor zu bauen. Das rückkoppelnde Element eines solchen Motors ist der Kollektor, der an der Rotorwelle angebracht ist und den Strom im gegebenen Zeitpunkt unterbricht und umpolt, so dass es statt zu einem einmaligen Anziehen des Rotors durch den Stator zu einem ständigen Wechsel von Anziehung und Abstoßung und damit zu einer kontinuierlichen Rotation des Rotors kommt.

Die Schaffung universell verwendbarer Motoren, eines der Kardinalprobleme beim Antrieb künstlicher Automaten, konnte durch das Rückkopplungsprinzip verwirklicht werden.

Die Eigenschaften der Rückkopplung wurden im Jahre 1657 von Christian Huygens (1629-1695) an der Pendeluhr entdeckt, die Bezeichnung "Rückkopplung" selbst entstand jedoch erst im Jahre 1906 bei den Untersuchungen E. Ruhmers über die Erzeugung elektrischer Schwingungen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Theorie der Rückkopplung (die Regelungstheorie) in ständiger Wechselwirkung mit der Praxis zu einem Gebiet von außerordentlicher Bedeutung für die gegenwärtige und zukünftige Technik entwickelt. Wichtige Ergebnisse der Regelungstheorie stammen von J. C. Maxwell, I. A. Wysznegradski, A. M. Ljapunow und A. A. Andronow.

Die Wirkung solcher Rückkopplungen, die durch lineare Differentialgleichungen<sup>16</sup> beschreibbar sind, kann relativ leicht im voraus berechnet werden. In vielen anderen Fällen lässt sich jedoch eine mathematische Analyse nicht ohne weiteres durchführen.

Diese Analyse ist aber sehr wichtig, weil das Verhalten eines automatischen Regelungssystems vielfach schon durch kleine Veränderungen in den Beziehungen der Teile des Systems untereinander stark beeinflusst werden kann. Irgendeine Rückkopplung, die Ablauf und Stabilität des Arbeitsprozesses kontrollieren soll, beginnt plötzlich sich aufzuschaukeln, und die Maschine, deren Funktionieren sie garantieren soll, wird buchstäblich in ihre Einzelteile zerlegt.

Die Regler haben wie alle signaltransformierenden Systeme eine äußerst bemerkenswerte Eigenschaft: sie können zu komplizierten Kombinationen zusammengefasst werden, bei denen ein System ein anderes steuert und dessen Eigenschaften verändert.

Etwas Ähnliches finden wir in der organischen Chemie; hier bilden zwei Elemente - Wasserstoff und Kohlenstoff - unbeschränkt kompliziert strukturierte Stoffe, vom Sumpfgas Methan bis hin zu den hochmolekularen Verbindungen der belebten Natur, den Fetten, den Kohlehydraten, den Eiweißstoffen und den Nukleinsäuren.

---

<sup>16</sup>Eine Differentialgleichung für eine Funktion einer Veränderlichen (z.B. der Funktion, die den Zustand eines Systems in Abhängigkeit von der Zeit beschreibt) ist eine Beziehung zwischen dieser Funktion, ihren Ableitungen und weiteren Funktionen dieser Veränderlichen, die die Form einer Gleichung hat. So ist zum Beispiel

$$t \cdot [y''(t)] + [(y'(t))^2] - 4[y(t)] = 2t$$

eine Differentialgleichung, zu der  $y(t) = t^2$  eine Lösung ist, d.h.,  $y(t) = t^2$  erfüllt diese Differentialgleichung bei beliebigem  $t$ :

$$t \cdot [2] + [2t]^2 - 4[t^2] = 2t$$

Eine Differentialgleichung für eine gesuchte Funktion  $y(t)$  heißt linear, wenn  $y$  und keine Ableitung von  $y$  mit einer anderen Potenz als 1 vorkommt. Die angegebene Differentialgleichung ist also nicht linear, da  $y'$  mit der Potenz 2 vorkommt.

Eine Dampfmaschine z.B. besitzt eine Rückkopplung von der Kurbelwelle zum Schieber, der die Dampfzufuhr zum Zylinder abwechselnd freigibt und unterbricht. Läuft die Maschine aus irgendeinem Grunde schneller, so wird die Zufuhr nur kürzere Zeit freigegeben, es strömt weniger Dampf ein, und die Maschine verlangsamt ihren Lauf; die Rückkopplung wirkt negativ.

Aber die Praxis hat gezeigt, dass diese Rückkopplung nicht ausreicht, um den Lauf der Maschine bei wechselnder Belastung konstant zu halten. James Watt vervollkommnete die automatische Steuerung der Dampfmaschine durch eine zweite Rückkopplung, durch den Fliehkraftregler: Zwei massive, an Stangen befestigte Kugeln rotieren um eine Welle, die von der Kurbelwelle der Maschine angetrieben wird.

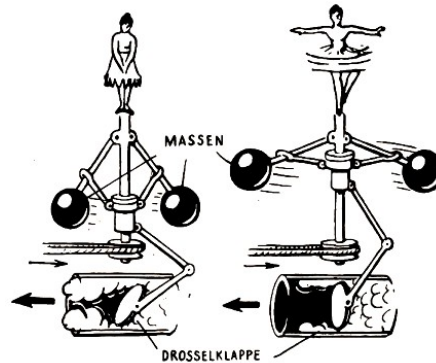


Bild 5.7.: Das klassische Beispiel einer automatischen Regelung der Fliehkraftregler Watts. Die Laufgeschwindigkeit der Maschine hängt von der Geschwindigkeit der Achse des Fliehkraftreglers ab. Läuft die Maschine schneller, so dreht sich auch diese Achse schneller und die Fliehkraft vergrößert sich, die Kugeln werden angehoben, dadurch wird über einen Hebel die Dampfzufuhr gedrosselt, und die Drehzahl sinkt ab.

Steigt die Laufgeschwindigkeit der Dampfmaschine, dann streben sie wegen der Fliehkraft nach außen und betätigen ein Hebelwerk, das die Dampfzufuhr drosselt, also als Verstärker der Rückwirkung dient. Diese zweite Rückkopplung wirkt mit der ersten zusammen und verbessert die Stabilität des Gesamtsystems gegenüber zufälligen Änderungen der Umweltbedingungen.

Bei der Untersuchung der Programmsteuerung sind wir von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass das Programm dabei die unmittelbare Ursache für die Einwirkungen der Maschinen auf das Material ist: für die Bewegung des Fräasers, des Bohrers oder des Schiffchens einer Webmaschine. Doch soll die Maschine das Programm nicht nur einfach ausführen, sozusagen als Selbstzweck, sondern es soll damit ein bestimmtes Ziel, ein bestimmter Verarbeitungszustand des Materials erreicht werden.

Daher bestehen stets eine Reihe von Verbindungen zwischen dem Werkstück und der Maschine zur Kontrolle, ob das Programm richtig ausgeführt wird. Die Verbindungen bilden eine Rückkopplung, wenn in der Maschine ein Regler vorhanden ist, der die von den Kontrollorganen der Maschine übermittelten Signale auswertet und in Befehle umwandelt, die die Maschine z.B. dazu veranlassen, einen fehlerhaft durchgeführten Vorgang zu wiederholen oder ein verdorbenes Werkstück aus dem Produktionsprozess herauszuziehen.

Das Programm beeinflusst also eigentlich den Prozess nicht direkt, sondern verändert die Abstimmung der Rückkopplung, genauer, des Reglers in dieser Rückkopplung, denn durch das Programm sind dem Regler Weg und Ziel der Maschine bei dem gegebenen Prozess vorgegeben. Auf dem vorgezeichneten Weg muss er die Maschine halten. Darauf begründet sich die Bezeichnung Nachlaufsystem für derartige Regelungssysteme.

Im Unterschied zu einem gewöhnlichen automatischen Regler, der einen gegebenen Zustand des geregelten Systems gegenüber äußeren Einwirkungen stabil erhält, besitzt ein Nachlaufsystem einen Regler mit variabler Abstimmung, die durch einen Programmspeicher, von Hand oder durch andere Rückkopplungen, eingestellt und verändert wird.

Die Rudermaschine eines Schiffes ist ein Nachlaufsystem, das zwischen der Stellung des Ruders und der des Steuerrades eine bestimmte Beziehung herstellt. Durch Drehen des Steuerrades verändert der Rudergänger die Abstimmung der Rudermaschine, d.h. gibt der Rudermaschine einen neuen Sollwert ein, und die Rudermaschine bewegt nun das Ruder, bis seine Stellung diesem Sollwert entspricht - das Ruder läuft dem Sollwert nach.

Dass die Stellung des Ruders nicht einfach (ohne Rückkopplung) gesteuert werden kann, ergibt sich daraus, dass sie ständig zufälligen Einwirkungen ausgesetzt ist, nämlich dem Wellenschlag. Diese Störung wird von der Rudermaschine durch eine Rückkopplung, die aus einem Vergleich der tatsächlichen Stellung des Ruders mit der erwünschten (dem Sollwert) entsprechende regelnde Einwirkungen ableitet, eliminiert.

Die Rudermaschine besitzt also eine solche Struktur, dass dieselbe Ursache - eine Bewegung des Ruders - ganz verschiedene Folgen hat. In einigen Fällen wirkt sich diese Ursache nicht auf den Kurs des Schiffes aus, in anderen Fällen verstärkt sie sich und hat entscheidende Folgen für das Schiff. Das Tausende Tonnen schwere Schiff ändert den Kurs, weil der Rudergänger das Steuerrad ein wenig gedreht hat. Doch das Schiff ändert seinen Kurs nicht, wenn nur eine Welle das Ruder bewegt hat.

Nach welchem Programm stimmt nun der Rudergänger die Rudermaschine ab?

Dieses Programm ist der Kurs des Schiffes, der vom Kapitän oder Steueremann nach der Karte festgelegt und dem Rudergänger angesagt wird. Der Rudergänger betätigt dann das Steuerrad nach der Kompassnadel, deren Stellung gegenüber dem Schiff sich in dem Maße ändert, in der das Schiff seine Fahrtrichtung ändert.

Hier ist also eine weitere Rückwirkung zu beobachten: die Fahrtrichtung des Schiffes bedingt die Stellung der Kompassnadel zum Schiff, nach welcher der Rudergänger sich beim Steuern des Schiffes richtet. Auf hoher See ist eine Änderung des Kurses nur dann erforderlich, wenn das Schiff durch eine Strömung vom Kurs abgedrängt wurde und wieder in die nach dem Verlassen des Hafens festgelegte Richtung gebracht werden muss. Es ist also noch eine Rückwirkung zu verzeichnen, nämlich jene der Umgebung auf das Programm des Rudergängers.

Das Programm steht also im allgemeinen selbst in Wechselwirkung mit der Umgebung des Systems. Wenn durch eine Rückwirkung der Umgebung eine Programmänderung notwendig wird, dann muss der Kapitän in Aktion treten und dem Rudergänger ein neues Programm ansagen. Selbstverständlich hat der Kapitän dieses Programm nicht schon fertig im Kopf, sondern er muss es erst mit Hilfe seiner Kenntnisse ausarbeiten.

Das Wesen dieser Arbeit besteht darin, dass sie zielgerichtet ist. Es entsteht dabei nicht irgendein Programm, sondern eines, bei dessen Verwendung das Schiff den Zielhafen in kürzester Zeit und ungefährdet erreicht. Das Aufstellen des neuen Programms nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch. In der Wirkungskette:

"Kurs des Schiffes - Versetzung durch eine Strömung - Feststellung und Messung der Abdrift - Aufstellen des neuen Programms - neuer Kurs des Schiffes"

ist also eine Verzögerung vorhanden.

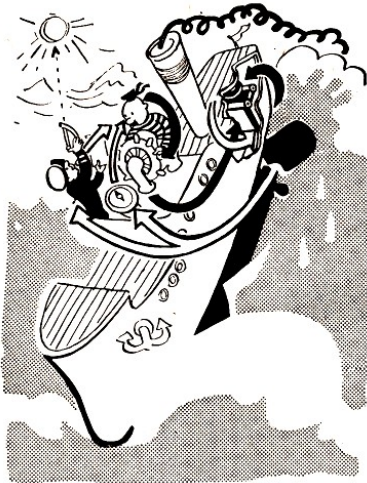


Bild 5.8.: Die von verschiedenen Rückkopplungen gebildeten Regelkreise können ineinander verschachtelt sein. Auf einem Schiff bildet die Rudermaschine ein Regelungssystem, das die Stellung des Ruders den Befehlen des Rudergängers entsprechend einregelt. Rudergänger, Steuerrad und Kompass bilden einen weiteren Regelkreis, der vom Kapitän abgestimmt wird, indem dieser dem Rudergänger den Kurs ansagt.

Der Kapitän, seine nautischen Instrumente und der Rudergänger bilden einen dritten Regelkreis, bei dem der Kapitän als Regler auftritt und bei veränderter Situation dem Rudergänger einen neuen Kurs angibt. Der Kapitän wird von außen nur durch das ihm angegebene Fahrtziel abgestimmt.

Man kann jede Rückkopplung mit einer Verzögerung beliebiger Dauer ausstatten, indem man die Rückkopplung unterbricht, an einem Ende der Unterbrechungsstelle eine Schreibvorrichtung anbringt und am anderen eine Vorrichtung, die nach einer gewissen Zeit das aufgezeichnete Diagramm abliest und von neuem in Signale umwandelt.

Die Länge des Papierstreifens, der die Vorrichtungen verbindet, und dessen Bewegungsgeschwindigkeit bestimmen die Verzögerung; es ist dabei unwesentlich, ob auf dem Papier eine Kurve, eine Ziffernfolge oder Buchstaben wie in einem Schriftsatz aufgezeichnet werden.

Zur Arbeit eines Geflügelzüchters gehört es, den Brutkasten zu bedienen, d.h. ein Programm für dieses Temperaturregelungssystem aufzustellen.

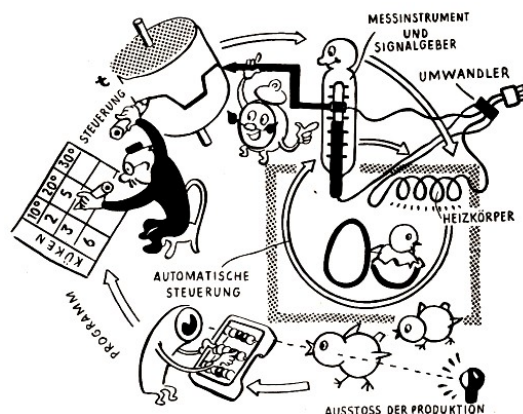


Bild 5.9.: In dieser Brutmaschine wird die Temperaturregelung durch einen Thermo-Umschalter bewirkt, die Programmsteuerung jedoch durch den Geflügelzüchter. hl sinkt ab.

Es wäre sehr nützlich, ein System von Reglern zu konstruieren, das - an den Brutkasten angeschlossen - von sich aus, ohne weitere Instruktionen oder Einwirkungen, die Küken auf die günstigste Weise ausbrütet. In diesem System könnte es die verschiedensten Kanäle und Verbindungen zwischen der Brutmaschine und ihren Steuerorganen geben; trotzdem erreichen wir - solange das System keine Nachrichten von den Küken und den Eiern erhält und es gleichbleibt, ob die Küken schlüpfen oder in den Eiern zugrunde gehen - keinerlei zielgerichtete Steuerung. In diesem System wird niemals ein Programm gegenüber einem anderen den Vorzug erhalten.

Es sind zwei verschiedene Dinge, einer Maschine ein strenges und vollständiges Programm einzugeben oder ihr die Aufgabe zu stellen, die betreffende Arbeit - in einem genau bestimmten Sinn - optimal auszuführen.

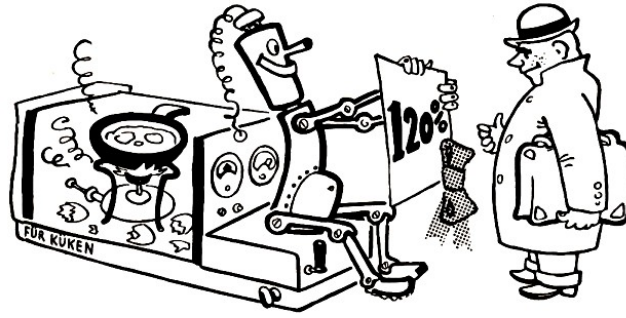


Bild 5.10.: Ein nach einem "Kriterium" arbeitendes Regelsystem kann die Tendenz zu Betrug zeigen.

Wenn an einer Brutmaschine ein Zähler für die eingelegten Eier und ein zweiter für die geschlüpften Küken angebracht ist, ferner eine Vorrichtung, die die Differenz zwischen den Angaben des ersten und des zweiten Zählers ausrechnet, dann kann man der Maschine die Aufgabe stellen, so zu verfahren, dass diese Differenz möglichst klein wird.

Die Maschine erhält damit ein Kriterium, mit dessen Hilfe sie die Programme, die sie nun aufstellt, bewerten kann. Das bessere Programm muss zur kleineren Differenz führen.

Ich vermute aber, dass eine Maschine mit unkontrollierten Rückkopplungen eine unerwünschte Rückkopplung zwischen den Zählern entwickeln kann und, anstatt sich um die Küken zu kümmern, die Zähler so zu beeinflussen beginnt, dass sich günstige Ziffern ergeben; dass sie also wie ein abgefeimter Betrüger handeln kann.

Indem die Maschine ihre Abstimmung selbst ändert, kann sie eine Anzahl von möglichen Programmen erproben. Durch Speicherung der beim Anwenden dieser Programme erhaltenen Ergebnisse kann sie danach auf Grund des Kriteriums das "beste" Programm herausuchen, sichern, häufiger anwenden und eventuell weiter verbessern.

Wir stehen nun vor einem uralten Paradoxon, das die Menschen bereits in grauer Vorzeit beschäftigt hat. Schon der Römer Cicero hat sich gefragt: Könnte man, wenn man aus Metall Buchstaben formt und diese wie Spielwürfel wahllos wirft, dieselben nicht auch einmal in einer solchen Anordnung vorfinden, dass man ein Gedicht des Poeten Ennius ablesen kann?

Die Mathematik zeigt, dass dies durchaus möglich ist, wenn man sehr lange würfelt.

Man kann auch eine Maschine bauen, die auf diese Weise Gedichte schreibt, im Laufe der Zeit also auch alles, was Ennius gedichtet hat. Letzten Endes würde eine solche Maschine auch alle Werke von Cicero, Puschkin, Goethe und von allen anderen Dichtern, Schriftstellern und Philosophen hervorbringen.

Wer kennt nicht die klassischen Verse des Dichterfürsten Goethe, die beginnen:

Vom Eise befreit sind Strom und Bäche  
Durch des Frühlings holden, belebenden Blick.

Sehen wir vom Sinn ab, den uns dieser Vers vermittelt, so haben wir es mit einer bestimmten Kombination von Buchstaben, Satzzeichen und dem Zwischenraum zwischen Wörtern zu tun. Eine einfache Rechnung zeigt, dass jeder Vorgang, bei dem sich eine sehr große Anzahl verschiedenartiger Anordnungen zufällig einstellen - z.B. die Bewegung der Moleküle in einer winzigen Menge Luft, das Niederfallen von Regentropfen, der Tanz der Mücken im Sonnenlicht -, auch einmal das angegebene Zitat - allerdings in kodierter Form - hervorbringen kann. Dieser Schluss mag unwahrscheinlich anmuten, doch er ist mathematisch streng begründet.

Wenn wir Mücken im Lichtstrahl vor einer Photozelle tanzen lassen und die Änderungen der Stromstärke über einen Verstärker in Kombinationen von Ziffern - z.B. von Einsen und Nullen



- umwandeln, so erhalten wir eine ununterbrochene Folge solcher Ziffernkombinationen.

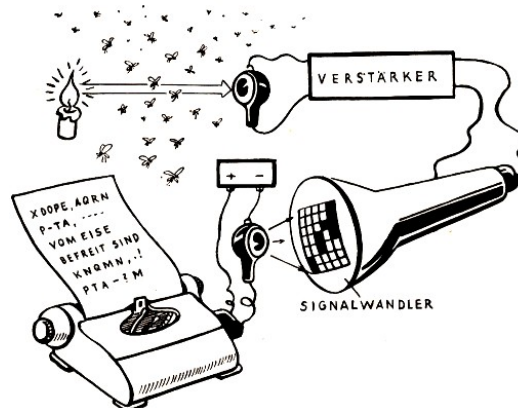


Bild 5.11. Dieses System kann beispielsweise zur Umwandlung von Rauschen in Buchstabenkombinationen dienen. Es ist keineswegs ausgeschlossen, dass einige dieser Zusammenstellungen für uns "sinnvoll" erscheinen.

Diese Folgen führen wir einer Maschine zu, die an Stelle der Kombination 00001 den Buchstaben "a", der Kombination 00010 den Buchstaben "b", statt 00011 "c" usw. niederschreibt. Die Zeit, die die Maschine braucht, bis unter den verschiedenen Buchstabenkombinationen der Vers

Vom Eise befreit sind Strom und Bäche  
Durch des Frühlings holden, belebenden Blick.

erscheint, hängt dann von der Arbeitsgeschwindigkeit dieses Systems ab, und es ist natürlich nicht ausgeschlossen, dass er bereits einige Minuten nach dem Einschalten der Maschine abgelesen werden kann, ebensowenig ist es ausgeschlossen, dass man darauf Jahrtausende warten muss.

Es gibt zweifellos viele Erscheinungen, denen die Potenz innewohnt, sinnvolle Signalkombinationen zu liefern. Doch diese Fähigkeit ist unbeständig, die Erscheinungen liefern nicht nur sinnvolle Kombinationen. Ein Vers in einem Buch kann uns zu jeder Zeit den Sinn übermitteln, der ihm innewohnt, der Mückentanz würde dagegen schon im nächsten Augenblick eine unsinnige Buchstabenanhäufung hervorbringen.

Das Chaos, die Unordnung, oder wie die Kybernetik sagt, das Rauschen, kann in der beschriebenen Weise nicht nur als "Schriftsteller", sondern auch als "Maler", als "Komponist" usw. wirken.

Stellen wir uns ein sehr umfangreiches Album vor, das lauter Schwarzweißbilder im Format 6 cm mal 9 cm enthält. Jedes Bild stellt eine der möglichen Kombinationen winziger schwarzer und weißer Punkte dar, die mit bloßem Auge nicht einzeln wahrgenommen werden können, und das Album enthält alle derartigen Bilder.

Was würde das für ein Album sein! Es enthielte - in Schwarzweiß - die Porträts aller Menschen der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft, in jedem Lebensalter und jeder Lebenslage, die Bilder aller Bauwerke der Erde, auch der nur projizierten oder gar nur gedachten, die Abbildungen aller Lebewesen des Universums, den Inhalt aller Filme, auch der Probeaufnahmen und der Szenen, die dem Schnitt zum Opfer fielen.

In ihm wäre ebenso eine Karte des sagenhaften versunkenen Erdteils Atlantis zu finden, wie

jede Handschrift von Archimedes, dazu die Literatur aller Epochen bis in die fernste Zukunft - auch die umfangreichsten Werke -; jede Seite fände auf einem anderen Bild ihre Fortsetzung. Es gäbe nichts auf Erden und im gesamten Universum, was nicht bereits in diesem Album abgebildet wäre.

Alle wertvollen Ergebnisse der menschlichen Vernunft würden aber in dem uferlosen Chaos der schwarzen und weißen Punkte untergehen ...

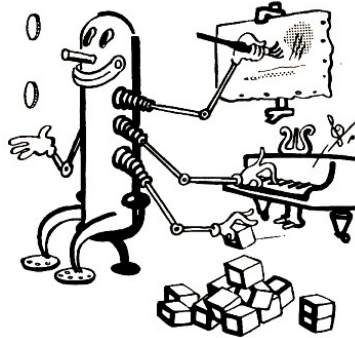


Bild 5.12.: Das Rauschen kann Bilder, Musikstücke und Skulpturen schaffen, doch ist eine derartige "künstlerische Betätigung" des Rauschens sinnlos.

Die Anzahl aller Bilder des erdachten Albums ist sehr groß, aber nicht unendlich. Nehmen wir an, dass der Durchmesser der Punkte (der "Quantelungsschritt") dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges entspricht, für die übliche Betrachtungsentfernung also 0,25 mm beträgt, dann gibt es auf jedem Bild 86400 schwarze oder weiße Punkte und deshalb insgesamt  $2^{86400}$  Bilder.

Das ist eine ungeheuer große Zahl! Man hat ausgerechnet, dass die Anzahl aller Atome eines Körpers von der Größe unseres Sonnensystems etwa  $2^{200}$  beträgt; folglich ist die Zahl  $2^{400}$  gleich der Anzahl der Atome in so vielen Sonnensystemen, wie ein Sonnensystem Atome hat. Aber selbst diese Zahlengiganten sind winzig klein gegenüber der unvorstellbar großen Zahl der Bilder in unserem Album!

Außerdem kann es vorkommen, dass man eine bestimmte Zusammenstellung, die man erhält, nicht deuten oder anwenden kann. Die Auswahl einer Kombination (als sinnvoll oder sinnlos) aus dem Rauschen richtet sich nämlich nach einem Auswahlkriterium. Wir können einem Automaten, z.B. irgendeiner Lesemaschine, die Aufgabe stellen, aus dem Wust der Buchstabenkombinationen, die durch das Rauschen produziert werden, das angegebene Goethe-Zitat herauszusuchen. Dazu müssen wir dieses Zitat aber kennen.

Das wahllose Durchsuchen einer Vielzahl verschiedener Möglichkeiten ist letzten Endes praktisch bedeutungslos. Die harmlos erscheinende Niederschrift riesiger Zahlen durch eine Potenz führt uns am Kern der Sache vorbei. Um dem zu begegnen, müssen in jedem realen System Begrenzungen gegeben sein, die es ermöglichen, den größten Teil der auftretenden Fälle von vornherein auszuschalten. Diese Beschränkungen und Kriterien zu finden, das ist das Kernproblem bei der Konstruktion eines Steuerungsautomaten.

Die Welt, so wie sie sich uns heute mit allen ihren Einzelheiten, wie Atommeilern, Dampfmaschinen, Brutkästen usw. darbietet, bildet keine chaotische Anhäufung von Atomen und Molekülen, sondern stellt nur einen Zustand aus einer kontinuierlichen Kette von Zuständen der Welt dar. Bei der Fortsetzung dieser Kette hat nicht jeder Zustand die gleiche Wahrscheinlichkeit, als nächster Zustand aufzutreten.

Der Tag verwandelt sich allmählich in die Nacht, der Winter in den Frühling, Missmut in Freude.

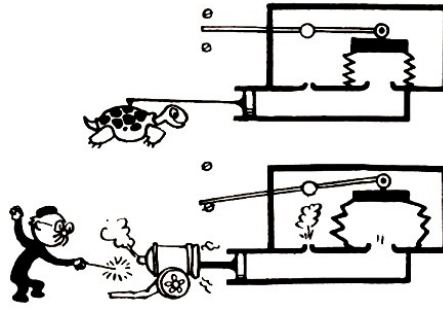


Bild 5.13.: Das pneumatische System, das hier abgebildet ist, reagiert nicht auf Druckveränderungen, sondern auf die Geschwindigkeit der Druckänderung. Es kann als "voraussehendes" nichtlineares Glied einer Rückkopplung dienen.

Ein speziell eingerichteter Regler ist imstande, die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Veränderungen des folgenden Zustandes zu berücksichtigen und ihnen seine Befehle anzupassen. Damit gewinnt der Regler eine gewisse Voraussicht auf Signale, die er vom gesteuerten System mit großer Wahrscheinlichkeit in nächster Zukunft erhält. Hierzu ein ganz einfaches Beispiel:

In einer Rückkopplung befindet sich als Regler ein Gefäß, in dem der Luftdruck von einer bestimmten Eigenschaft - wie man sagt, von einem Parameter - der gesteuerten Maschine abhängt. Das von der Maschine einlaufende Signal, der Luftdruck, bewegt eine Membran im Regler, die über einen Hebel ein steuerndes Signal an die Maschine abgibt. Bei jeder Druckänderung im Gefäß bewegt sich der Hebel, und diese Bewegung führt zu einer solchen Änderung des erwähnten Parameters, bei der der Druck im Gefäß wieder sinkt. Ein derartiges System ist im allgemeinen instabil, es schwingt mehr oder weniger stark.

Wir verändern nun den Regler so, dass er nicht wie bisher jede Druckänderung in eine proportionale Hebelbewegung umformt, sondern - wie man sagt - nichtlinear reagiert. Dazu wird die Membran mit einer Kammer umgeben, die durch eine kleine Öffnung, eine Düse, mit dem Gefäß verbunden ist. Durch diese Düse kann Luft aus dem Gefäß in die Kammer einströmen.

Wenn sich der Druck im Gefäß nicht ändert, dann ist auch der Druck auf jeder der beiden Seiten der Membran gleich. Vergrößert sich der Druck in der Kammer, dann ist der Druck auf die Membran vom Gefäß aus zunächst größer, erst etwas später wird der entsprechende Gegendruck von der Kammer aus erzeugt, da die Luft zum Überströmen in die Kammer Zeit braucht.

Die Membran reagiert jetzt nicht mehr auf Druckänderungen schlechthin, sondern auf die Geschwindigkeit der Druckänderung. Sie bewegt sich desto stärker, je schneller die Druckänderung erfolgt. Auf langsame Druckänderungen reagiert das System nicht.

Das System "merkt sich" seinen gegenwärtigen Zustand, und es "nimmt an" - wie wir auch -, dass mit großer Wahrscheinlichkeit nach einer Minute der gleiche Zustand wieder eingetreten sein wird, dass es also unnötig ist, auf diese Änderung zu reagieren.

Durch eine gar nicht so komplizierte Veränderung am Regler gewinnt diese Rückkopplung eine Eigenschaft, die mit den Verben "merken", "vergleichen", "differenzieren" (das Ermitteln der Geschwindigkeit der Druckänderung ist eine Operation, die dem mathematischen "Differenzieren", dem Ableiten einer Funktion, entspricht), "einstellen auf die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Zustandes" und schließlich "voraussehen" zu bezeichnen ist.

Unser Regler sei für das folgende so eingerichtet, dass sich die Membran nicht in Abhängigkeit vom Absolutwert der Geschwindigkeit bewegt, sondern nur dann, wenn die Druckänderung ihre Richtung ändert, d.h., wenn sich der Druck nach einem Anstieg wieder verringert oder nach einem Abfall wieder verstärkt (die Mathematiker sagen: wenn die Ableitung ihr Vorzeichen ändert).

Wenn der Druck im Gefäß z.B. die Energiemenge angibt, die für eine bestimmte Arbeit aufgewendet wird, dann reagiert der Regler nur darauf, ob weniger oder mehr Energie als früher benötigt wird. Mit der verfügbaren Energie zweckmäßig zu wirtschaften, ist ein unumstößliches Prinzip in unserem mechanisierten Zeitalter. Das beschriebene System überwacht den Energieverbrauch der Maschinen.

Wenn seine Signale, die eine Erhöhung dieses Verbrauchs anzeigen, so auf die Maschine zurückgekoppelt werden, dass sie dort als Befehle verstanden werden, die zu einer Ausschaltung überflüssigen Energieverbrauchs führen, dann tendiert das Gesamtsystem tatsächlich zur größten Ökonomie, die im gegebenen System möglich ist.

Ein solches System wird nicht mehr wie ein stupider Formalist die Temperatur im Brutkasten "entsprechend der Instruktion" regeln, wenn dabei wahrscheinlich die Hälfte der Küken zugrunde gehen würde. Es wird vielmehr nach dem Prinzip "Das Bessere ist der Feind des Guten" handeln und eine Temperatur herstellen, bei der eine möglichst große Anzahl von munteren Flaumbällchen den Brutkasten verlässt.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Rückkopplung sogar das Bestreben zeigt, mehr Küken auszubrüten, als Eier eingelegt worden sind. Das wäre kein gar so schlimmer Fehler, schließlich wollen auch wir Menschen manchmal mehr, als wir können.

Das Prinzip der zielsuchenden Regelung wurde erstmalig im Jahre 1944 von dem sowjetischen Ingenieur W. W. Kasakewitsch verwendet. Ein zielsuchender Extremalregler folgt den sich verändernden Eigenschaften des zu regelnden Systems und verändert das Programm der Regelung mit dem Ziel, den größten (oder den geringsten, mit einem Wort: den extremalen) Wert einer bestimmten Größe - z.B. des Brennstoffverbrauchs, der Geschwindigkeit, der Leistung - zu erreichen.

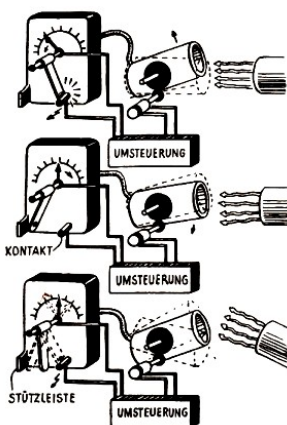


Bild 5.14.: Der Extremalregler bewegt das Einströmrohr in der von rechts anströmenden Luft so, dass die Strömung in diesem Rohr möglichst stark ist. Diese Aufgabe ist einfach zu lösen:

Vergrößert sich die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr, so wird es nach der gleichen Seite weiterbewegt. Verringert sie sich aber, so erfolgt der Befehl zur Umkehrung der Bewegungsrichtung. Diesen Befehl gibt ein Bügel, der auf der Welle des Manometers sitzt, das die Strömungsgeschwindigkeit misst, jedoch nicht starr mit dieser verbunden ist, sondern beim Anschlag an den Kontakt oder die Stützleiste rutscht. Dreht sich die Welle nach rechts, so schlägt der Bügel an die Stützleiste, bewegt sie sich nach links, so wird der Kontakt geschlossen.

In Reglern dieser Art befindet sich ein Zufallsgenerator, eine Quelle für Rauschen, die den Regler zu zufälligen Befehlen veranlasst. Diese Befehle bewirken, dass der vom Regler beobachtete Parameter des geregelten Systems eine geringe Veränderung erfährt, er kommt damit dem angestrebten Extremalwert entweder näher oder entfernt sich von ihm.

Der Regler, der das beobachtet, verstärkt nun in dem Fall, dass der Parameter sich in der gewünschten Weise verändert, seine Einwirkung, anderenfalls gleicht er sie durch eine entge-

gegengesetzte Einwirkung wieder aus. Auf diese Weise regelt der Extremalregler den Parameter des Systems auf einen Extremwert (z.B. ein Maximum) ein. Die Erfindung der Extremalregelung stellte einen großen Fortschritt in der Automatisierungstechnik dar, sie vervielfachte die Möglichkeiten zur Konstruktion von Automaten.

Das Suchen nach einem Ziel, doch nicht das chaotische Suchen Ciceros oder unserer hypothetischen Vorrichtung, die Verse und Unsinn abwechselnd aus zufälligen Bewegungen von Mücken erzeugen kann, sondern das Suchen in gegebener Richtung, von einem bereits erreichten Punkt ausgehend, ist eine der vollkommensten Steuerungsmethoden, welche die Wissenschaft erforscht hat und die durch ein System mit Rückkopplungen realisiert werden kann.

"Es ist eine Tatsache", bemerkt W. R. Ashby, "dass unsere Bewunderung fehl am Platze ist, wenn wir im Genie seine Produktivität bewundern. Nichts ist leichter, als neue Ideen zu generieren: bei einer entsprechenden Deutung produzieren ein Kaleidoskop, die Innereien eines Schafes, das Rauschen einer Elektronenröhre neue Ideen im Überfluss. Das Bemerkenswerte an einem Genie ist vielmehr die Fähigkeit, unter den vorhandenen Möglichkeiten die wertvollen Ideen herauszufinden."<sup>17</sup>

Was heißt nun "entsprechende Deutung"?

In unserer Maschine werden bestimmte Gruppen von Nullen und Einsen den Buchstaben zugeordnet; würde das mit ganzen Wörtern, etwa denen eines Wörterbuchs erfolgen, so wäre die Prozentzahl der sinnvollen Kombinationen merklich größer. Die Auswahl "verwandter" Wörter könnte die Wahrscheinlichkeit, sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, noch weiter vergrößern.

Vor siebenhundert Jahren hat der Mönch und Alchemist Raymondus Lullus (1232 bis 1315) eine Maschine konstruiert, die philosophische Begriffe wahllos miteinander verknüpfen konnte. Fast alle diese Verknüpfungen sollen sehr bedeutsam und tiefsinnig gewesen sein.

Über das Problem, durch wahllose Zusammenfügung sinnvolle Kombinationen zu erhalten, ließe sich noch viel sagen, doch wir wollen solche Überlegungen auf später verschieben.

Das Wichtigste an den automatischen Systemen ist die Abgeschlossenheit des Steuerungsprozesses, die sich durch Anwendung des Rückkopplungsprinzips ergibt.

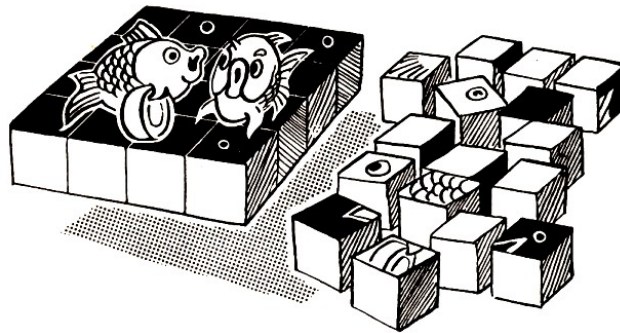
Eine Steuerung bzw. Regelung besteht nur dort, wo es Verbindungen gibt, die vom Objekt der Steuerung ausgehen und bei diesem wieder enden. Ihre Funktion besteht nach den Worten Norbert Wieners "in der Steuerung der mechanischen Tendenzen zur Desorganisation, mit anderen Worten darin, dass zeitlich und örtlich gewisse, der allgemeinen Tendenz zuwiderlaufende Entropieänderungen bewirkt werden".

Überall gibt es in sich geschlossene Ketten von Zusammenhängen. Oft besteht eine Verzögerung über eine längere Zeit, so dass der Zusammenschluss nicht unmittelbar ersichtlich ist.

---

<sup>17</sup>W. R. Ashby: Design for an intelligence amplifier. In Automata Studies, Annals of Mathematics Studies 34, Princeton 1956, Seite 218 (Bauplan für einen Intelligenzverstärker.)

## 6 Die Information, im wesentlichen der einzige Gegenstand der Kybernetik



Was gibt es noch außer dem Stoff und der Energie? - Information ist überall vorhanden, nur nicht in der "abstrakten" Skulptur eines Pfuschers - Zwischen der ehernen Welt von Laplace und dem Chaos - Die Schöpferkraft eines Kaleidoskops - Der ewige Motor und der ewige Informator - Nullen und Einsen - die allgemeinste Sprache - Nützliche und lehrreiche Informationsumwandlungen - Kodierung unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten - Warum sind Kriminalromane spannend, aber inhaltsleer, Protokolle langweilig, aber nützlich?

Vor fünf Jahren lernte der Autor einen "Erfinder" eines Perpetuum mobile kennen. Es war dies ein lebhafter, listiger, blasser, älterer Mensch, nahezu erblindet. Er kam irgendwoher aus dem Ural, um für seine Erfindung eine Unterstützung zu erhalten.

In Moskau wurde er von einem Enkel geführt, der zwar durch die Hilflosigkeit des Großvaters verwirrt war, aber seine Aufgabe geschickt löste.

Die Maschine hatte der Großvater mit einem sauberen Tuch eingewickelt. Sie ähnelte der Drahtkonstruktion, die man in Käfigen für Eichhörnchen findet: ein Rad, Stufen, ein ausgeklügeltes System von Spreizen und Gabeln. Sie bewegte sich nicht von selbst, auch mit einem Finger war sie nur schwer in Gang zu setzen.

Unsere Bemerkungen ließ der Alte wie ein Zeremoniell über sich ergehen. Dann sprach er ein paar eingeübte bittere Worte und zog weiter. Er hatte es eilig. Er fürchtete zu sterben, bevor er alle Instanzen durchlaufen und für seine Maschine alles menschenmögliche getan hatte.

Was können wir Ingenieure der furchtbaren Kraft der Chimäre<sup>18</sup> die den Alten beherrscht, entgegensetzen? Allein die Erfahrung der Menschheit, die in der knappen Formel des Satzes von der Erhaltung der Energie zusammengefasst ist:

"Energie kann weder verschwinden noch aus dem Nichts hervorgehen."

Diese Formel, wie auch der Satz von der Erhaltung des Stoffes, wurde im Laufe der Zeit aus einer Überzeugung entwickelt, deren Entstehung weit in die Vergangenheit zurückreicht und schon von den Philosophen der Schule Epikurs durch den Satz "Aus nichts entsteht nichts" verkündet wurde.

Lukrez hat dieses Prinzip poetisch in folgende Worte gekleidet:

"Könnten aber aus Nichts die Dinge werden, so könnt' auch  
Alles aus allem entstehn; nichts brauchte den zeugenden  
Samen. Menschen könnte das Meer, die Erde die schuppigen Fische

---

<sup>18</sup>Chimäre - Trugbild, Hirngespinnst (ursprünglich Fabeltier der griechischen Sage).

Zeugen und Vögel die Luft; dem Himmel entstürzten die Herden;  
Aller Tiere Geschlecht, die wilden sowohl als die zahmen,  
Würde, von ungewisser Geburt, bald Wüsten bewohnen,  
Bald das bebauete Land; nicht immer dieselbigen Früchte  
Trüger der Baum, es könnt' ein jeglicher Jegliches bringen."<sup>19</sup>

Es ist eigenartig, dass in dem Gedicht des Lukrez, das seit zweitausend Jahren bekannt ist, nicht nur Andeutungen über das Gesetz von der Erhaltung des Stoffes und über das Gesetz von der Erhaltung der Energie zu finden sind, sondern auch Bemerkungen über die Erhaltung eines Dritten gemacht werden, das weder Stoß noch Energie ist.

Tatsächlich entsteht aus Sand, Meerwasser und anderem, das im Wasser enthalten ist, kein Fisch, wenn nicht auch Fischlaich vorhanden ist, obgleich Stoff und Energie sowohl im Wasser als auch auf dem Festland in mehr als nur genügender Menge zur Verfügung stehen.

Im Fischlaich selbst gibt es aber auch keinen speziellen Fischstoff, auch keine besondere Energie, die das Entstehen von Fischen bewirken könnte. Allerdings ist das genannte Dritte darin enthalten; es geht von den Fischen auf ihre Jungen über, und wenn diese erwachsen sind und laichen, von diesen auf eine neue Generation von Jungfischen.

Zu demselben Schluss kann man gelangen, wenn man irgendwelche "Geheimnisse" aus den verschiedensten Bereichen der Welt beliebig herausgreift.

... Im täglichen Sprachgebrauch werden häufig die Ausdrücke "Fernsehübertragung", "Rundfunkübertragung" verwendet. Was verstehen wir eigentlich unter einer Übertragung? Was wird denn dabei übertragen?

Wenn wir bei Tisch von unserem Nachbarn das Salzfasschen erhalten, so ist in diesem Falle alles klar: uns wurde ein völlig realer, greifbarer Gegenstand übertragen. Aber was überträgt uns der Rundfunk? Etwa Energie?

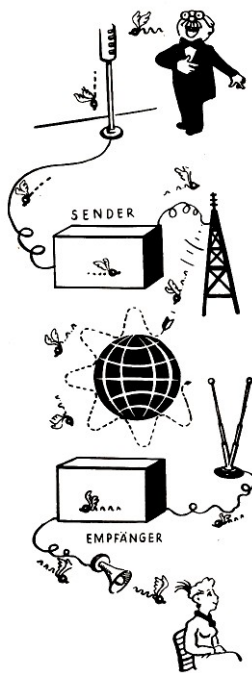


Bild 6.1.: Die Rundfunkübertragung ist ein einfaches Beispiel für einen Vorgang, bei dem sich zwar die physikalische Natur und die Form der Signale ändern, doch die Information im wesentlichen erhalten bleibt.

Das ist nicht der Fall, denn alle Energie (bis auf einen verschwindend kleinen Bruchteil), die zur Erzeugung von Sprache oder Musik notwendig ist, entnimmt der Empfänger an Ort und Stelle dem Elektrizitätsnetz. Etwa Schall? Auch das muss verneint werden, denn die Übertragung erfolgt auf dem Wege vom Sprecher zum Hörer nur zu einem kleinen Teil durch Schallwellen in der Luft, zum größten Teil jedoch durch elektromagnetische Wellen, die vom Gehör nicht aufgenommen werden können. Etwa Signale? Das trifft die Sache schon besser, doch die Signale verändern sich auf dem Übertragungswege mehrmals, und es ist letztlich für uns gleichgültig, welche der vielen möglichen Übertragungsmethoden die Funkingenieure anwenden.

Wir nehmen die Rundfunksignale einer Sprachübertragung nicht wahr, und selbst wenn wir sie wahrnehmen könnten, so müssten wir sie erst "lesen" lernen. Darunter ist eine "Übersetzung"

<sup>19</sup>Vergleiche die Fußnote auf Seite 22: T. Lucretius Carus A. a. 0. Erstes Buch, Vers 156 bis 163.

in Wörter zu verstehen, und zwar genau in die gleichen Wörter, die der Sprecher vor dem Mikrofon ausgesprochen hat.

Diese Wörter sind Signale, die wir verstehen; sie sind in den Funksignalen in verschlüsselter Form enthalten - ebenso wie die Art der künftigen Fische im Laich. Anfang und Ende dieser Kette von Umwandlungen liegen sozusagen im Dunkeln; es ist schwierig zu ergründen, wie sich die Wörter im Gehirn des Journalisten bilden, wenn er eine schriftlich erhaltene Nachricht vorzutragen hat, und welche Wirkungen die Wörter dann im Kopf des Hörers hervorrufen.

Doch die Wörter sind kein Selbstzweck; in ihnen ist etwas vorhanden, das wir "Sinn" nennen, und dieser Sinn bleibt auf dem ganzen langen Weg vom Sprecher im Rundfunkstudio bis zum Hörer erhalten, vom geschriebenen Text über Auge und Gehirn des Sprechers, über dessen Stimmorgan - Kehlkopf, Stimmbänder, Gaumenhöhle - zum Mikrofon, weiter über Verstärker, Sender und Antenne, dann über den "Äther" (das elektromagnetische Feld), nochmals über eine Antenne zum Empfangsgerät, über dessen Lautsprecher zum Ohr des Hörers und von diesem zum Gehirn.

Von der nüchternen Technik wollen wir nun ins Reich der Trugbilder und Phantome überwechseln. Es scheint so, als ob das gar kein Thema für naturwissenschaftliche Untersuchungen, sondern Gegenstand romantischer Phantasie wäre.

Aber es zeigt sich, dass auch Trugbilder und Geistererscheinungen (wie auch Wesentlich realere Dinge, z.B. Träume, Wahnvorstellungen Geisteskranker, von denen man nicht einfach sagen kann, dass es sie nicht gibt) ebenfalls objektiven Gesetzen unterliegen.

Sie beruhen in jedem Falle auf bestimmten realen Grundlagen. Eine Geistererscheinung hat ein Geschlecht - es handelt sich meistens um eine bleiche vornehme Dame, die irgendwelchen verworrenen Umständen zum Opfer fiel, oder um einen bärtigen Despoten, der düsteren Blicks in klirrender Ritterrüstung durch die Säle geht. Die Rüstung selbst stammt - wie aus bestimmten Merkmalen hervorgeht - aus dem sechzehnten Jahrhundert.

Wenn wir dann aus vergilbten, aber verlässlichen Schriftstücken feststellen, dass der bärtige Despot nicht im sechzehnten, wie man bisher annahm, sondern im elften Jahrhundert gelebt hat, so bringen wir seine "Erscheinung" in arge Verlegenheit; sie muss statt dieser Rüstung eine wesentlich ältere anlegen.

Traumgebilde, Halluzinationen und Geistererscheinungen sind, wenn auch in unvollständiger und verzerrter Form, Abbilder realer Erscheinungen. Ohne diese Abbilder wären sie gar nicht möglich. Der modernistische Maler Yves Klein aus Paris hat vor kurzem eine "Skulptur" geschaffen, die er "Zone der immateriellen Empfindung" nannte.

Unter dieser Bezeichnung stand im Ausstellungsraum - nichts. Der "Schöpfer" gab dennoch den Wert seiner "Skulptur" mit 400 Dollar an. Produkte der Kunst werden schließlich nicht nach ihrer Masse und nach der Art ihres Materials bezahlt, und somit bestand der Betrug eigentlich gar nicht darin, dass Klein für das Geld kein entsprechendes Stück Marmor oder Bronze geliefert hat.

Selbst das "formloseste" Stück hat letztlich irgendeine Form; die "Zone" war in gewisser Hinsicht gar nicht mehr zu überbieten, sie hatte sozusagen alle Formen, die überhaupt vorkommen können. Yves Klein würde also durchaus logisch handeln, wenn er für seine "Zone" soviel Geld forderte wie für alle Plastiken der Welt, denn die "Zone" umfasst die Formen aller dieser Werke. Doch noch logischer ist es, ihm dafür gar nichts zu bezahlen, denn in jeder Plastik ist zumindest "etwas" enthalten (das gilt auch für eine bloße Kopie), und zwar ist dieses "Etwas" das Ergebnis einer Auswahl unter allen Formen, die als Skulptur überhaupt möglich sind.



Am Beispiel des erwähnten ungewöhnlichen Albums ist ersichtlich, dass auch die Anzahl der "möglichen Skulpturen" eine endliche Zahl ist, und dass sich in der Folge aller Skulpturen leicht solche finden ließen; die wir als mechanische Kopien bereits vorhandener Plastiken und nicht als neue Kunstwerke ansehen müssen.

Ein Rätsel hat dann Sinn, wenn es eine Lösung gibt. Bei der Geburt eines Tieres, bei der Übertragung einer Meldung durch den Rundfunk, beim Auftreten einer Geistererscheinung und beim Werden einer Plastik unter dem Meißel eines wirklichen Künstlers kann man stets ein "Etwas" herausfinden, das sich in seiner allgemeinen Eigenschaft bewahrt, wenn es von einem Stoff zu einem anderen oder von einer Energieform in eine andere übergeht.

Das mattglänzende Photopapier mit der Aufnahme der Mondrückseite ist dadurch ausgezeichnet, dass es helle und dunkle Bildpunkte in der gleichen Anordnung enthält, in der sich die Geländedetails auf der Mondrückseite, die bisher noch kein Mensch gesehen hat, bei einem bestimmten Sonnenstand darbieten. Große Anstrengungen waren nötig, um diese Anordnung wiederzugeben, d.h. vom Mond auf das Papier zu übertragen.

Wenn der Fernschreiber an Stelle von Buchstaben Kombinationen elektrischer Impulse übermittelt oder ein Kodierer Buchstaben in Ziffernfolgen verwandelt, ändern sich die Signale, aber sie ändern sich umkehrbar, das "Etwas", das durch diese Signale übertragen wird, bleibt also - obgleich verborgen - erhalten.

Wenn ein Mensch ein Buch liest, so entnimmt er diesem etwas Allgemeineres als die Anordnung der Buchstaben, er erhält etwas, und dieses "Etwas" geht von den Seiten des Buches in sein Gehirn über. Die Form der Muffe, die von einer programmierten Drehbank hergestellt wird, ist durch das Zusammenwirken der Maschine und des Programms festgelegt ebenso wie die Reaktion einer Katze beim Anblick einer Maus durch das Zusammenspiel der Maus und des Nervensystems der Katze.

Doch in allen diesen Fällen gibt es etwas, das man nicht durch Zufall, etwa durch Werfen einer Münze und einer entsprechenden Deutung der Wurfsergebnisse - Zahl oder Wappen - als schwarze oder weiße Punkte, als Buchstaben eines Textes, als Abmessungen der Muffe oder als Bewegungen der Katze - gewinnen kann. Auch sind wir davon überzeugt, dass weder das Gehirn noch eine beliebige Maschine dieses "Etwas" aus sich selbst heraus hervorzubringen vermag.

Würde das Gehirn oder die Maschine vollkommen "frei", vollkommen selbständig funktionieren, käme lediglich sinnloses Zeug heraus, sehr ähnlich dem, was sich ergäbe, wenn wir wie oben eine Münze werfen und die Wurfsergebnisse in schwarze und weiße Punkte, in Buchstaben, in Abmessungen oder in Bewegungen umsetzen würden.

Wir wollen zunächst dem geheimnisvollen "Etwas" eine Bezeichnung geben und es Information nennen. Die Information ist der grundlegende Begriff in der Theorie der Steuerung und Regelung, im wesentlichen der einzige Gegenstand, den die Kybernetik untersucht.

Man kann die Information weder anfassen noch sehen. Sie ist ein Maß für das Geordnetsein von Systemen in ihrer Struktur und Funktionsweise, sie ist ein Kennzeichen für den Unterschied vom Chaos, für die Organisation und die Zielstrebigkeit der Systeme.

"Wie die Entropie ein Maß für die Desorganisation ist, so erweist sich die durch eine Signalfolge übertragbare Information als ein Maß für die Organisation", führt Norbert Wiener aus.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup>Norbert Wiener: The Human Use of Human Beings - Cybernetics and Society. New York 1954. page 31. (Deutsch unter dem Titel: 'Mensch und Menschmaschine - Kybernetik und Gesellschaft' im Metzner-Verlag,

Es gibt mehrere Definitionen für den Informationsbegriff, die sich von der oben dargelegten unterscheiden. "Information", so schreibt WIENER an anderer Stelle, "ist also ein Name für den Inhalt dessen, was mit der äußeren Welt ausgetauscht wird, wenn wir uns ihr anpassen und sie dies spüren lassen."

Diese Definition ist weniger treffend, da sie den Informationsbegriff auf die menschliche Wahrnehmung beschränkt. "Information ist eben Information und weder Stoff noch Energie", lesen wir gleichfalls in den Schriften Wieners.

Nun fragen wir uns: Existiert in der Realität noch etwas anderes außer Stoff und Energie?

Es mutet an, als ob nach einem Streit über den Begriff "Existenz" den Beteiligten folgender Kinderreim durch den Kopf geht:

*A und B*

Auf dem Kanapee,

*A* lief weg, *B* ging fort,

Wer blieb dort?

Wir könnten uns vorstellen, dass ein aufgeweckter Junge, der im Mathematikunterricht gelernt hat, dass *A* und *B* nicht schlechthin Symbole und Buchstaben, sondern Bezeichnungen für real existierende Gegenstände sind, plötzlich von sich aus auf den Gedanken käme, dass Buchstaben auch Symbole für Beziehungen, für Verhältnisse zwischen Gegenständen sein können.

Von Gegenständen und Erscheinungen kann man ohne weiteres sagen, ob sie real existieren oder nicht, aber bei Beziehungen oder Verhältnissen ist das nicht mehr ganz so einfach. Die Stühle stehen um den Tisch herum: zweifellos existieren Tisch und Stühle, aber existiert dann auch das "Herum"?

*A* und *B* im Kinderreim sind Gegenstände, zugegeben: doch was für ein Gegenstand ist denn das "Und"? Kann das "Und" etwa dortbleiben, wenn *A* wegläuft und *B* fortgeht? Man könnte denken, dass das nicht möglich ist, wenn man die Meinung vertritt, dass Verhältnisse und Beziehungen nicht real existieren, dass die Gegenstände erst von der Erkenntnis zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Das "Herum" kann man nicht in die Hand nehmen, auch nicht betasten, hinlegen, in eine Kiste tun und wegtragen, es hat weder Masse noch Farbe, noch Temperatur. Es scheint, als ob es von konkreten miteinander in Beziehung stehenden Gegenständen nicht abgetrennt werden kann. Diese Meinung ist aber falsch.

Es ist doch eigenartig, dass verschiedene Menschen, die sich nicht vorher miteinander verständigt haben, relativ einheitlich nicht nur den Tisch und die Stühle bemerken, sondern auch das "Herum", die Beziehung zwischen dem Tisch und den Stühlen. "Herum" (als Kurzform für "rundherum") bedeutet, dass sich Gegenstände in annähernd gleicher Entfernung von einem Zentrum befinden, ähnlich den Punkten an der Peripherie eines Kreises.

Die Entfernung der Gegenstände vom Zentrum - der Radius des Kreises - ist eine bestimmte Größe. Auch wenn die Messung von verschiedenen Menschen ausgeführt wird, decken sich die Maßzahlen der Messergebnisse (vorausgesetzt, dass die gleiche Maßeinheit verwendet wird und Tisch und Stühle ihren Ort beibehalten, auch sei von zufälligen Fehlern abgesehen).

Zwischen den Gegenständen und Erscheinungen in unserer Welt bestehen unermesslich viele Beziehungen und Verhältnisse; ihre Anzahl und ihr Bestehen ist vom Stand der menschlichen Erkenntnis unabhängig. Irgendwo auf dem Mond, in einer namenlosen Felsspalte, liegen ne-

beneinander zwei Steine. Kein Lebewesen hat sie je erblickt. Und dennoch gibt es zwischen ihnen ein "Nebeneinander", so wie es zwischen den Stühlen und dem Tisch ein "Herum" gibt.

Wozu diene uns die Wissenschaft, wozu hätten wir Augen und Ohren, wenn die Beziehungen und Verhältnisse in der Welt von unserer Willkür und Laune abhingen? Beziehungen und Verhältnisse sind also objektive Gegebenheiten der Realität. Sie sind nicht Stoff und nicht Energie und besitzen höchst interessante Eigenschaften.

Zum einen muss man beachten, dass unsere Erkenntnis von einer Beziehung oder einem Verhältnis nicht mit dieser Beziehung bzw. diesem Verhältnis identisch ist; sie ist vielmehr ein mehr oder weniger vollkommenes Abbild der realen Gegebenheiten.

Wir streben zwar an, dass dieser Unterschied praktisch bedeutungslos bleibt, d.h., wir vervollkommen unsere Erkenntnis, aber dieser theoretische Unterschied lässt sich nicht aufheben, weil der Mensch als Erkennender der Welt gegenübertritt. Daher sind in seiner Betrachtungsweise stets subjektive Momente enthalten, seine Urteile hängen von bestimmten Gesichtspunkten ab.

So wird man die Stühle um unseren Tisch als "benachbart" zu diesem Tisch bezeichnen, nicht aber Steine auf der Oberfläche des Mondes. Betrachtet man aber dieselbe Gegebenheit aus kosmischen Entfernungen, so wird man finden, dass der Mond benachbart zur Erde, die Steine auf dem Mond benachbart zu unserem Tisch sind.

Jede genaue Beschreibung einer Gegebenheit in der Realität erfordert die Angabe des Koordinatensystems, von dem aus gesehen diese Beschreibung erfolgt. Dabei wird also aus der Menge aller möglichen Koordinatensysteme eines ausgewählt, das man für besonders geeignet hält. Es gibt stets geeignete und ungeeignete Koordinatensysteme, aber weder "richtige" noch "falsche", wie Einstein zeigte.

Zum anderen kann man die Verhältnisse und Beziehungen durch Abstraktion von den konkreten Dingen, zwischen denen sie bestehen, in gewisser Weise loslösen.

Ich markiere auf einem Blatt Papier zwei Punkte und sage: Hier ist ein Tisch, und hier ist ein Stuhl. Die Beziehung zwischen den beiden Möbelstücken geht dabei in eine Beziehung zwischen den Punkten eines Plans über; dabei abstrahiere ich davon, dass es sich bei den gegebenen Dingen um einen Tisch und einen Stuhl handelt.

Diese Beziehung wird genauer beschrieben, wenn ich einen Maßstab oder einen Richtungspfeil mit den Bezeichnungen "Nord-Süd" in den Plan einzeichne. Ich schreibe: "Der Abstand zwischen dem Tisch und dem Stuhl beträgt 30 cm."

Damit wird die gleiche Beziehung durch eine Maßzahl und eine Maßeinheit ausgedrückt; sie geht nunmehr in eine Beziehung zwischen dem Metallstab, der in Paris als Urmeter sorgfältig aufbewahrt wird, und den Regeln der deutschen Sprache, dem dekadischen Zahlensystem und meiner Handschrift, über - kurz: in eine Beziehung zwischen ganz verschiedenartigen Erscheinungen unserer Welt.

Wenn wir sprechen, lesen, denken, erkennen - immer haben wir es mit Beziehungen und Verhältnissen zu tun. Wenn bestimmte Beziehungen und Verhältnisse als Quellen für Kenntnisse dienen oder zumindest zu solchen Quellen werden können, so kann man sie als Informationspotentiale bezeichnen. Durch diese Umbenennung soll lediglich zum Ausdruck kommen, dass stets irgend etwas erkannt oder getan werden kann, ganz gleich, ob es sich um Dinge, Erscheinungen oder um Beziehungen und Verhältnisse zwischen den Dingen und Erscheinungen handelt.

Wir haben künstliche Erdsatelliten und Planetoiden gestartet; automatische Sonden haben den Mond erreicht und sich der Venus und dem Mars genähert. Diese Erfolge haben sehr viel Arbeit und einen großen Materialaufwand erfordert. Was haben wir damit erreicht? Wir haben auf diesem Wege Informationen erhalten, die wir auf anderem Wege nicht bekommen konnten.

Indessen gibt es gegenwärtig auf dem Mond offenbar keinerlei Naturerscheinungen, von denen wir sagen könnten, dass sie zielstrebig und gesteuert seien. Analoge Verhältnisse waren - wenn auch unter wesentlich anderen physikalischen Bedingungen auch auf unserer Erde vor Millionen Jahren vorhanden, als es noch keine Lebewesen, geschweige denn Maschinen und andere Schöpfungen des Menschen gab.

Was erregt denn das besondere Interesse eines Paläontologen an einem Stück Gestein, das auf den ersten Blick kaum anders aussieht als viele andere umherliegende Steine? Es sind die Spuren einer Zielstrebigkeit, einer zielgerichteten Bearbeitung, die nachweisen, dass dieser Stein Gegenstand und Produkt menschlicher Tätigkeit - der primitiven Arbeit eines Urmenschen - ist, dass also bereits eine Steuerung existierte.

Aber in den unbewohnten Kratern und Ebenen des Mondes, wie auch in den frühen geologischen Formationen der Erdkruste, existieren nur Informationspotentiale, die bei Abwesenheit von Signalsystemen nicht realisiert werden können.

Jedoch bilden nicht alle überhaupt möglichen Beziehungen und Verhältnisse gleichwertige Informationspotentiale. Es gibt stabile, mehr oder weniger gesetzmäßige, wiederholbare und sich wiederholende Beziehungen und Verhältnisse, die sich dadurch vom Chaos unterscheiden. Andererseits wirken in jedem Prozess zufällige Elemente mit, die mit den zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten in keinem Zusammenhang stehen.

Wären alle Prozesse und Vorgänge starr determiniert, dann würde offenbar alles leicht zu erkennen und zu erfassen sein. Dann wäre aber jedes Erkennen und Erfassen der Dinge und Beziehungen nutzlos; denn es ließe sich auch durch die Anwendung des Erkannten nichts am Lauf der Welt ändern.

Der große französische Mathematiker P. S. Laplace (1749-1827) hat einmal die Überzeugung geäußert, dass alles in der Welt seine feste Ursache habe und nichts "von selbst" vor sich gehe; er hat sich ein unendlich großes Signalsystem, den sogenannten "Laplaceschen Dämon", vorgestellt, dem die Anfangszustände und die Bewegungsgesetze aller Atome des Weltalls bekannt sind.

Ein solches Signalsystem könnte, so meinte Laplace, alle zukünftigen Ereignisse in der Welt voraussagen und die Geschichte bis in die graue Vorzeit zurückverfolgen, und zwar in allen Einzelheiten, bis zu den innersten Regungen eines jeden Menschen.

Doch in einer solchen "Laplaceschen Welt" gibt es keinen Raum für eine Steuerung der Geschehnisse, und jene ungewöhnliche Kraft der Voraussage, die der Geist besitzt, ist ebenso unnütz wie die Gabe der Cassandra. Dieses sonderbar begabte Mädchen sah, wie die altgriechischen Mythen zu berichten wissen, zwar die verhängnisvollen Ereignisse um ihren Bruder Paris und Helena, der Frau des Königs Menelaos, voraus, doch konnte sie nichts dagegen tun und auch nicht verhindern, dass Troja zerstört wurde.

Umgekehrt kann dagegen eine chaotische Welt, die einem wahllos hingeschütteten Haufen von verschiedenfarbigen Kugeln gleicht, einer beliebigen Steuerung unterworfen werden. Denn dadurch, dass alle künftigen Zustände einer solchen Welt gleichwahrscheinlich sind, also keiner dieser Zustände vor den anderen irgendwie ausgezeichnet ist, ist auch kein Steuerungsprogramm den anderen gegenüber ausgezeichnet, insbesondere ist kein Programm "zielstrebig"

als ein anderes.

In unserer Welt gibt es zwei Informationspotentiale; das Potential der Nachrichten über die Gesetze und das Potential der Wirkungen, die auch von Zufällen bei der Realisierung dieser Gesetze abhängen.

Die reale Welt geht von einem gegebenen Zustand nicht in irgendeinen anderen über; es gibt eine Vielzahl "verbotener" Kombinationen, die niemals realisiert werden.

Weil die Sonne eine glühende Gaskugel ist, kann es auf ihr keine Eisberge und auch keine Oasen mit Pflanzenwuchs geben, weil auf dem Mond weder Luft noch Wasser vorhanden ist, können dort nicht ohne weiteres menschenähnliche Wesen leben.

Wir verfügen schon über eine große Menge von Informationen über den Mond, jedoch wissen wir kaum Näheres über die Venus. Doch eines wissen wir sehr gut: es gibt auch auf der Venus keine chaotischen Kombinationen beliebiger Erscheinungen und Ereignisse wie z. B. das gleichzeitige Auftreten von starker Strahlung und Leben oder von Hitze und Kälte; auch gibt es dort keine Geister und kein Perpetuum mobile.

Die allgemeinen Gesetze des Weltalls gelten auch auf der Venus, obgleich sie den Zustand der Venus nicht eindeutig festlegen. Es gibt eine Menge "erlaubter" Zustände, d.h. Zustände, die den Naturgesetzen nicht widersprechen, und in einem dieser Zustände befindet sich die Venus. Das Potential der Nachrichten über die Venus ist für die heutige Wissenschaft zwar bedeutend kleiner, als es für die Menschen war, die den Morgenstern und den Abendstern für zwei verschiedene Himmelskörper hielten, aber es ist immer noch sehr groß. Die kosmischen Sonden haben die Aufgabe, dieses Potential verkleinern zu helfen.

Andererseits gibt es auf der Venus auch ein Potential der Wirkungen. Wenn die Menschheit die natürlichen Bedingungen auf der Venus kennen würde, so könnte sie ihr Wissen und ihre Erfahrungen weiterentwickeln, sie könnte ihre Technik vervollkommen und anwenden und schließlich diesen Planeten ihren Interessen - dem vom Menschen gesetzten Kriterium der Zielstrebigkeit - entsprechend nutzen.

Kombinationen, die die gleiche Wahrscheinlichkeit haben (nach Definition ist die Information ein Maß für die Organisation eines Systems), besitzen den gleichen Informationsgehalt. So haben die bizarren bunten Figuren, die wir mittels eines Kaleidoskops - eines einfachen optischen Spielzeugs - erhalten, gleich große Informationspotentiale, da sie aus gleichwahrscheinlichen, rein zufälligen Kombinationen verschiedenfarbiger und verschiedengestalteter Körperchen entstehen - und zwar durch einen einfachen physikalischen Vorgang: eine mehrfache Spiegelung. Im Kaleidoskop sind - um eine Zahl zu nennen - zehn farbige Plättchen willkürlich angeordnet.

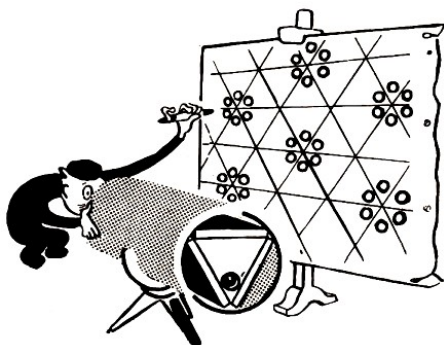


Bild 6.2.: Die Bilder im Kaleidoskop werden von einer sehr einfachen ordnenden Vorrichtung aus dem Rauschen erzeugt.

Die Möglichkeiten für die Anordnung dieser Plättchen sind im Kaleidoskop nicht eingeschränkt. Wir haben aber den Eindruck, dass 240 Plättchen vorhanden sind, deren Anordnung eine gewisse Regelmäßigkeit zeigt.

Jedes einzelne Plättchen erscheint nämlich infolge der Spiegelung 24mal. Bei 240 Plättchen gäbe es aber eine weitaus größere Anzahl von Kombinationen als bei 10 Plättchen. Die Konstruktion des Kaleidoskops sondert sozusagen von den möglichen Kombinationen der vermeintlichen 240 Plättchen jene regelmäßigen aus, die sich durch Spiegelung von zehn Plättchen ergeben, die anderen Kombinationen sind "verboten".

Das Wirken eines auswählenden oder ausschließenden Prinzips (Gesetzes) in einer Folge von Dingen und Erscheinungen macht sich für uns stets durch das Auftreten einer Ordnung, einer Information, bemerkbar. Obwohl das Betrachten der bunten Sterne im Kaleidoskop weder Durst zu löschen noch Hunger zu stillen vermag und auch sonst gar keinen praktischen Zweck hat, gab es im Laufe der Geschichte regelrechte "Epidemien" der Begeisterung für dieses Spielzeug. Der Jesuit Athanasius Kircher gab an, dass um die Mitte des siebzehnten Jahrhunderts allein in Paris täglich 60000 Kaleidoskope hergestellt und verkauft wurden. Offensichtlich liegt die Freude am Erscheinen einer Ordnung, einer strengen Gesetzmäßigkeit, in der Mentalität der Menschen der damaligen Zeit begründet; das zeigt sich auch in den Rhythmen, den Tänzen und Musikstücken, den Ornamenten auf Kleidungsstücken und Einrichtungsgegenständen, der architektonischen Gestaltung der Gebäude, der Kalligraphie<sup>21</sup> dem Schach und vielem anderen.

Der praktische Zweck dieser "Nutzung" der Informationspotentiale war letzten Endes, die natürliche Fähigkeit der Menschen, in ihrer Umwelt nach Gesetzmäßigkeiten und deren Andeutungen zu forschen, zu vervollkommen und auf das Ziel zu richten, später Gesetze klar zu erfassen, Zukünftiges vorauszusagen und Verhalten und Handlungen zielstrebig zu gestalten.

Nicht weniger interessant ist eine zweite Seite des Kaleidoskops: Nachdem es sehr rasch große Verbreitung gefunden hatte, verschwand es ebenso plötzlich wieder.

Ganze Generationen wussten nichts von ihm. Der Fabrikant Brewster gab es im Jahre 1817 als seine Erfindung aus. Gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts wurde es von neuem erfunden und "Debuskop" genannt. Das liegt vermutlich daran, dass das unkomplizierte Aussonderungsprinzip, das beim Kaleidoskop Anwendung findet, rasch durchschaut wird und dann aufhört, Interesse zu erregen.

Bei der Betrachtung der Rückkopplung haben wir gesehen, dass die Funktionsweise eines Regelungssystems darin besteht, dass der Regler das System durch seine Befehle nach und nach den Nachrichten anpasst, die er aus der Umwelt erhält.

Dasselbe können wir auch so ausdrücken: zwischen dem Informationspotential der Nachrichten in der Umwelt und dem Informationspotential der Wirkungen (Befehle) des Reglers bestand eine Differenz. Der Informationsfluss durch den Verbindungskanal übertrug eine Informationsmenge, die dieser Differenz entspricht, und diese verringert sich dabei bis zum Verschwinden.

Ein Vorteil dieser Darstellungsweise liegt darin, dass sie es ermöglicht, komplizierte kybernetische Systeme in einzelne Teilsysteme, wie Übertragungskanäle, Speichereinrichtungen, Informationswandler usw., zu zerlegen, deren Informationsaustausch untereinander und mit der Umwelt des Systems sich leichter untersuchen lässt als das System im ganzen genommen.

Damit ein elektrischer Strom fließt, muss neben unterschiedlichen elektrischen Potentialen auch ein Elektrizitätsleiter vorhanden sein. Ganz entsprechend kann ein Informationsfluss erst dann zustande kommen, wenn neben zwei differierenden Informationspotentialen ein Übertragungskanal zwischen beiden Potentialen vorhanden ist. Im allgemeinen bildet ein Automat

---

<sup>21</sup>Kalligraphie - Schönschreibkunst

diesen Kanal.

Der Informationsfluss im Innern eines Automaten hebt sich scharf von anderen Informationsflüssen ab. Im Automaten treten Signale in eine solche Wechselwirkung, dass eine geordnete Funktionsweise des Automaten zustande kommt. Als innere Information des Automaten bezeichnen wir jene in der Konstruktion und im Programm des Automaten realisierte Information, die eine zielgerichtete Verarbeitung der Signale gewährleistet.

Als Potentiale der inneren Information sind zu nennen: das Potential der Befehle und das Potential der Übergänge. Welcher Befehl aus der Menge aller dem Steuerungssystem des Automaten möglichen Befehle in einer gewissen Situation gegeben wird, ist zunächst unbestimmt. Durch Verarbeitung eingehender und gespeicherter Informationen erzeugt das Steuerungssystem Signale, die diese Unbestimmtheit beseitigen, so dass ein eindeutig bestimmter Befehl erteilt wird.

Unter dem Einfluss der gleichen Informationen ändert das Steuerungssystem eventuell seinen Zustand, d.h., es wählt aus dem Potential der Übergänge den diesen Informationen entsprechenden Übergang aus und führt ihn durch, es nimmt also einen (im allgemeinen) neuen Zustand an.

"Die Information kann im Steuerungsprozess in eine beliebige Form umgewandelt werden, wobei ihre Menge nicht größer wird" - so könnte man das Grundgesetz, dem die Information unterliegt, formulieren.

Es entsteht daher die Frage, wie Informationsquantitäten zu messen und zu vergleichen sind. Die Messung oder Zählung von Informationen muss mit anderen Methoden durchgeführt werden als die Messung oder Zählung von Stoff und Energie.

In zwei gleichen, auf gleiche Spannung geladenen Akkumulatoren ist doppelt soviel Energie enthalten wie in einem dieser Akkumulatoren, zwei Ziegelsteine enthalten doppelt soviel Stoff wie einer. Aber in jedem Exemplar dieses Buches ist die gleiche Informationsmenge enthalten wie in zwei Exemplaren zusammen, ja wie in der ganzen Auflage.

Wenn ein Mensch ein Buch liest, so entnimmt er diesem Information. Wenn er das Buch durchgelesen hat, ist darin immer noch genausoviel Information enthalten wie zuvor. Der Autor, der ein Buch geschrieben oder eine Lektion vorgetragen hat, wird davon nicht "dümmer", er büßt dabei die Gedanken, die er vorher hatte, keineswegs ein.

In jedem Steuerungssystem ist eine gewisse Informationsmenge enthalten. Das System kann diese Information beliebig oft abgeben, ohne sie zu verlieren, ohne eine Einbuße zu erleiden. Ebenso vergrößert eine Information, die schon im Gedächtnis gespeichert ist, die Informationsmenge des Systems nicht mehr, wie oft sie auch von diesem System empfangen werden mag. Wenn das System so beschaffen ist, dass es alle diese "neuen" Informationen speichert, dann ist die Differenz zwischen der Menge der eingegebenen Informationen und dem Speicherinhalt konstant. Abgeschlossene Signalsysteme, d.h. solche Systeme, in die nichts eingegeben wird, können ihren Informationsinhalt nicht vergrößern.

Ehe die Wissenschaft den Satz von der Erhaltung der Energie entdeckt hatte, war bereits durch die Technik praktisch erwiesen, dass es unmöglich ist, ein Perpetuum mobile zu bauen. Aus der Unmöglichkeit, mittels einer Maschine Energie aus dem Nichts zu gewinnen, wurden wichtige Folgerungen abgeleitet. Im Jahre 1843 gelang es dem Physiker Joule, die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme quantitativ durch das mechanische Wärmeäquivalent zu erfassen.



Bild 6.3.: Alle Versuche der Wahrsager, Kartenleger und Astrologen aus dem "Nichts" - aus den Handlinien, zufälligen Kombinationen von Spielkarten oder Konstellationen von Gestirnen - Ereignisse der Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft zu erkennen, waren und bleiben erfolglos.

Nicht weniger verbreitet und ebenso sinnlos wie das Suchen nach einem Perpetuum mobile ist das Streben, Information aus dem Nichts zu gewinnen.

Die Astrologen bemühten sich, Nachrichten über zukünftige Ereignisse oder über Menschenschicksale aus der Konstellation der Gestirne am Himmel zu gewinnen; die Wahrsager benutzten als Informationsquelle die Handlinien; nicht selten wird gewissen Kombinationen von Spielkarten ein bestimmter Sinn unterschoben. Alles das sind Versuche, Information "aus dem Nichts" (d.h. aus rein zufälligen, demnach keine Information tragenden Gegebenheiten) zu erzeugen, und natürlich bleiben solche Versuche ergebnislos.

Die Menschen gaben sich einem Trug hin: sie ordneten zufälligen Signalkombinationen solche zukünftigen Ereignisse zu, die mit großer Wahrscheinlichkeit eintreffen: "unverhoffte Freude", "Kummer", "weite Reise", "großes Haus", also alltägliche, im Leben jedes Menschen häufig auftretende Situationen oder Umstände. Die Ankündigung sehr wahrscheinlicher Ereignisse trägt aber nur eine Information, die praktisch gleich Null ist, zumal dann, wenn über ihren genauen Termin nichts ausgesagt wird. Informationen liefern dagegen Nachrichten über wenig wahrscheinliche (deshalb praktisch "verbotene") Situationen; z.B.: "Entdeckung einer neuen Insel", "Flug auf einem vom Wirbelsturm abgehobenen Dach" oder "Absturz vom Mond".

Heute können wir die Signale, welche die Information übertragen, in eine beliebige Form bringen, ohne an Information zu verlieren. Wir können Informationen so auf eine einfachere Form bringen, in der sie leichter umgewandelt und ihrer Qualität nach bewertet werden können. Der Begriff "Information" ist genau definiert worden durch Angabe eines allgemeinen Maßes für alle Formen von Informationen und eines allgemeinen Prinzips für die Messung von Informationsmengen.

Damit man einen Vorgang steuern kann, muss dieser Vorgang beeinflussbar sein. Wenn ein beliebiger Prozess vollständig determiniert abläuft, so kann dieser Vorgang wohl ausgelöst, danach aber nicht mehr gesteuert werden, denn es ist dann genau vorausbestimmt, was sich im folgenden Zeitpunkt ereignen wird. Wenn es aber in verschiedenen oder sogar allen Zeitpunkten mehrere Möglichkeiten für die Fortsetzung des Prozesses gibt, so kann unter Umständen durch ein Signal, das in diesen Zeitpunkten eingreift, jeweils eine dieser Möglichkeiten ausgewählt und damit dem Prozess eine gewünschte Richtung gegeben werden.

Dieses Signal ist daher selbst zeitabhängig, d.h., es besitzt im allgemeinen zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Signalwerte.

Bei der Steuerung von manchen Prozessen braucht nicht in jedem Zeitpunkt eine steuernde Einwirkung vorhanden zu sein, nur in bestimmten Zeitpunkten gibt es mehrere Fortsetzungsmöglichkeiten, und daher muss der Prozess nur in diesen Momenten gesteuert werden. Das steuernde Signal braucht also nur in diesen Zeitpunkten die entsprechenden Signalwerte anzunehmen, so dass man das Signal auffassen kann als eine Folge von Einzelsignalen, die darin



bestehen, dass genau ein Signalwert solange wie erforderlich auf den Prozess einwirkt. Das Signal bildet dabei also eine Folge von Einzelsignalen.

Wie kompliziert das Signal sein muss, hängt von der Anzahl der Möglichkeiten ab, in denen der Prozess sich fortsetzen lässt. Bestehen in jedem Moment nur zwei Möglichkeiten, ist also eine Alternative der Art "links oder rechts", "vorwärts oder rückwärts", "auf oder zu" gegeben, dann genügt ein Signal mit nur zwei Signalwerten, um den Prozess zu steuern.<sup>22</sup>

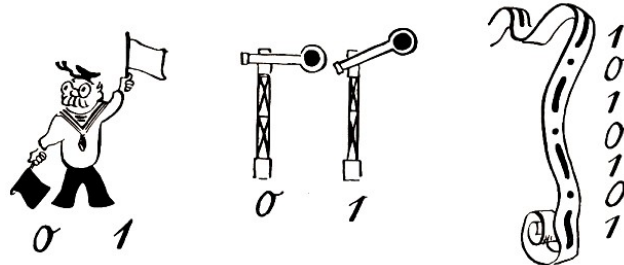


Bild 6.4.: Die Bedeutung eines beliebigen Einzelsignals hängt nicht von seiner physikalischen Form ab. Das Signal mit den beiden Signalwerten 0 und 1 kann durch Flaggenzeichen, durch die Stellung eines Semaphors oder durch graphische Symbole - Punkte und Striche - übermittelt werden.

Wenn man sich überlegt, wie viele Einzelsignale gebraucht werden, d.h., zu wie vielen Zeitpunkten das steuernde Signal in den Prozess eingreifen muss, um eine bestimmte Fortsetzung dieses Prozesses unter einer gewissen Anzahl von möglichen Fortsetzungen zu erreichen, dann stellt man fest, dass die Anzahl der Einzelsignale wesentlich langsamer wächst als die Anzahl der möglichen Fortsetzungen des Prozesses.

Stellen wir uns vor, dass ein Zug in einen Bahnhof einfährt und wir ihn auf ein bestimmtes von acht vorhandenen Gleisen leiten sollen. Die acht Gleise sind über sieben Weichen mit dem Hauptgleis verbunden, die so angeordnet sind, dass der Zug immer genau drei von diesen Weichen durchfährt, ganz gleich, welches Gleis er erreichen soll.

Es genügt darum, drei Einzelsignale - entweder "links" oder "rechts"- an drei Weichen zu geben, um den Zug auf das gewünschte Gleis zu lenken.

Allgemein lassen sich mit vier Alternativsignalen 16, mit fünf Signalen 32, mit  $n$  Signalen, wobei  $n$  eine beliebige natürliche Zahl ist, insgesamt  $2^n$  Möglichkeiten ansteuern. (Vgl. hierzu auch das Bild 6.7.)

Daher kann an Stelle des Auftrags: "Der Zug ist auf das fünfte Gleis zu leiten" die Signalserie "rechts - links - links" oder kurz "RLL" gegeben werden.

Das ist eine Serie von Befehlen, ein Programm, und seine äußere Form (RLL) kann Kodewort genannt werden. Ein Verfahren, nach dem gewissen Dingen, z.B. Signalen, Programmen, je ein Kodewort zugeordnet wird, heißt Kode.

Ohne Kenntnis des Zusammenhanges mit dem gesteuerten System können wir nur das Kodewort beobachten und untersuchen. Das Programm, d.h. der Sinn des Kodes, wird erst dann deutlich, wenn die Eigenschaften des gesteuerten Systems bekannt sind. Wenn ein Laie das Aufleuchten der Signallampen in einem Stellwerk beobachtet, so bemerkt er zwar, dass es stets nur zwei verschiedene Befehle gibt, doch was sie bedeuten, bleibt ihm zunächst verborgen. Nur wenn er auch die Bewegung der Eisenbahnzüge auf den Gleisen und Weichen verfolgt, kann er ihre Bedeutung erkennen.

<sup>22</sup>Solche Signale werden Alternativsignale, dichotomische, duale, dyadische oder binäre Signale genannt.

Die Bedeutung eines Programms hängt nicht davon ab, ob es durch Wörter, Flaggenschwenken, Aufleuchten von Signallampen, elektrische Impulse, Hebelbewegungen oder auf andere Weise gegeben wird, wie es kodiert ist. Diese Kodierungen sind verschieden, ihre Bedeutung aber ist gleich.

Deshalb ist es wünschenswert, einen allgemeinen, universellen Kode zu ermitteln, der in einfachster Weise die Auswahlmöglichkeiten charakterisiert, ohne Rücksicht darauf, was für Dinge oder Beziehungen ausgewählt werden.

Als ein solcher "Normalkode" kann eine Kodierung durch Folgen von Nullen und Einsen genommen werden, ein sogenannter Binärkode. Statt "rechts - links", "auf - zu" oder anderer konkreter Angaben treten dabei nur die beiden Ziffern 0, 1 in den Kodewörtern auf.

Kodiert man z. B. L durch 0 und R durch 1, so erscheint das Kodewort RLL jetzt als 100.

Warum werden gerade die Ziffern 0 und 1 und nicht Punkte, Striche oder andere Zeichen verwendet?

Sicher wäre es möglich, sich knappere, ökonomischere Zeichen auszudenken. Im Prinzip ist es bedeutungslos, ob Einserstriche und Nullenbögen, Punktgruppen wie in der Braillesche Blindenschrift oder chinesische Schriftsymbole verwendet werden. Es ist nur wichtig, dass es sich um genau zwei verschiedene Zeichen handelt. Das hat folgende Gründe.

Zum einen ist die Kodierung mit zwei Zeichen (bzw. Signalwerten) tatsächlich die einfachste in Bezug auf die Anzahl der Signalwerte. Mit nur einem Signalwert kann keine Information übertragen werden - das Signal wäre konstant.<sup>23</sup>

Mit einem Einzelsignal kann man nur ein einziges Kodewort gegebener Länge bilden, eine Auswahl unter verschiedenen Kodewörtern, wie sie zur Informationsübertragung nötig ist, ist unmöglich.

Zum anderen lassen sich solche Bauelemente zur Konstruktion von Automaten besonders einfach herstellen, die nur zwei verschiedene stabile Zustände besitzen, die - wie man sagt - bistabil sind. Binäre Signale können von solchen Bauelementen einfach aufgenommen, verarbeitet und erzeugt werden. Daher rechnen elektronische Rechenautomaten im allgemeinen auch im Dualsystem, in dem ja jede Zahl durch ein Kodewort aus Nullen und Einsen kodiert ist.



Bild 6.5.; "Einfach wie das Muhen" - hat Majakowski einmal gesagt. Doch das Übertragen des "Muh" durch ein Signal ist gar nicht so einfach. Beachten Sie, wie verschieden die Fixierung des Lautes "m" in den einzelnen Schriftsystemen auf unserer Erde - von der Keilschrift bis zur Stenographie - ausfällt!

<sup>23</sup>Man beachte, dass auch das Nichtsenden eines Signals ein Signal ist, nämlich das Senden des Signalwertes Null. Ein Signal, das nur einen Signalwert besitzt, kann diesen also nicht verändern, es ist konstant.

Es gibt noch verschiedene andere Vorzüge der Binärkodes, die im einzelnen auszuführen hier zu weit führen würde.

In der Praxis wird meist nicht danach gefragt, wieviel Möglichkeiten sich bei der Fortsetzung eines Prozesses in  $n$  Schritten ergeben, wobei in jedem Schritt eine von  $m$  Fortsetzungsvarianten auszuwählen ist, sondern es wird die umgekehrte Frage gestellt: "Wieviel Schritte muss ich festlegen, damit ich eine von  $N$  gegebenen Möglichkeiten erreiche?"

Die Anzahl der Schritte ist gleich dem Logarithmus der Zahl  $N$  genommen zur Basis  $m$ , der Anzahl der Möglichkeiten, die in jedem Schritt offenstehen. Ist beispielsweise  $m = 2$ , d.h., ich habe in jedem einzelnen Schritt zwischen zwei Fortsetzungsmöglichkeiten zu entscheiden, dann ist  $n = 1$  für  $N = 2$ ,  $n = 2$  für  $N$  bis 4,  $n = 3$  für  $N$  bis 8 usw., allgemein ist  $n$  die kleinste ganze Zahl, die nicht kleiner als  $\log_2 N$  ist.

Für  $N = 6$  ist  $\log_2 N$  ungefähr gleich 2,56; da es nicht möglich ist, 2,56 Schritte zu machen, müssen wir  $n = 3$  setzen, obwohl mit  $n = 3$  Schritten auch  $N = 8$  Möglichkeiten noch erfasst werden.

Ebenso wie wir beim Kodieren von Befehlen unabhängig vom gesteuerten Objekt, dem diese Befehle erteilt werden, vorgehen können und dabei nur die Zahl der möglichen Fortsetzungen des Prozesses zugrunde legen, können wir beim Kodieren von Nachrichten allein von der Anzahl der möglichen Ergebnisse des Vorganges, über den diese Nachricht informiert, ausgehen. Wenn dieser Vorgang z. B. das Werfen einer Münze ist, so sind zwei Ergebnisse möglich: Die Münze kann entweder Zahl oder Wappen zeigen.



Bild 6.6.: Eine Nachricht mit der Information 1 "Bit", der Maßeinheit der Information, ist z.B. die Mitteilung über das Ergebnis beim Werfen einer Münze, wenn wir über dieses Ergebnis noch nichts wissen.

Wäre die Münze ideal symmetrisch und würde sie jedesmal in absolut gleicher Weise geworfen, so bedeutete die Nachricht über das Ergebnis jedes weiteren Wurfes keinerlei Information mehr.

Untersuchen wir dagegen eine reale Münze und ihre Wurfweise, dann bildet das Ergebnis jedes einzelnen Wurfs eine Information für den Beobachter. Eine Information liegt auch dann vor, wenn durch die Eigenschaften von Münze und Wurfweise festgelegt ist, dass die Münze stets "Zahl" zeigt, der Beobachter das aber noch nicht weiß und daher das Ergebnis des nächsten Wurfes nicht voraussagen kann. (Er wird aber sicher nach wenigen Würfen diese Eigenschaft vermuten.)

Eine Mitteilung über das Ergebnis eines einzelnen Wurfs ist also eine Nachricht für den Beobachter, die wir mit unserem Zifferkode leicht ausdrücken können. Ordnen wir der Nachricht "Die Münze zeigt das Wappen" die Ziffer 0, der anderen Möglichkeit ("die Münze zeigt die Zahl") die Ziffer 1 (oder umgekehrt) zu, dann können die Ergebnisse einer Serie von Würfen in Form einer Folge von Nullen und Einsen übermittelt werden.

Wenn wir einen Eisenbahnzug beobachten, der in einen Bahnhof mit acht Gleisen einfährt, dann gibt uns das Kodewort mit den drei Einzelsignalen - RLL oder 100 -, da es die Ergebnisse der einzelnen Entscheidungen widerspiegelt, eine genaue Nachricht darüber, welches Gleis der Zug befahren wird.

Wir können also sowohl Nachrichten als auch Befehle in unserem 0-1-Kode kodieren, für beide Arten der Information ergeben sich die gleichen Abhängigkeiten zwischen der Anzahl der gleichwahrscheinlichen Möglichkeiten, die als Ergebnis oder Fortsetzung eines Prozesses auftreten

können, und der Länge der Kodewörter.

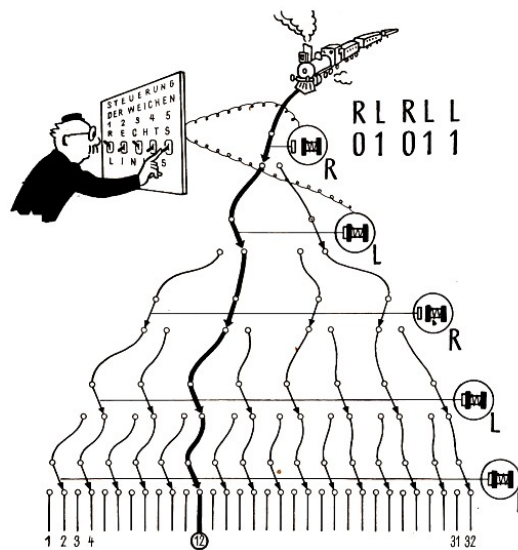


Bild 6.7.: Um einen Eisenbahnzug auf eines von 32 Gleisen zu leiten, sind insgesamt fünf Einzelsignale "rechts - links" erforderlich.

Es ist daher naheliegend, als allgemeines Maß der Information den Logarithmus dieser Anzahl zu wählen. Aus praktischen Erwägungen entschied man sich für den Logarithmus zur Basis 2. Die Maßeinheit der Information ist das Bit; ein Befehl (oder eine Nachricht) besitzt eine Information von 1 bit, wenn der Befehl (die Nachricht) aus einer Menge von zwei gleichwahrscheinlichen Fortsetzungen (Ergebnissen) des gegebenen Prozesses eine auszeichnet, d. h. diese Fortsetzung ansteuert, wenn es sich um einen Befehl handelt bzw. dieses Ergebnis meldet, wenn es sich um eine Nachricht handelt.

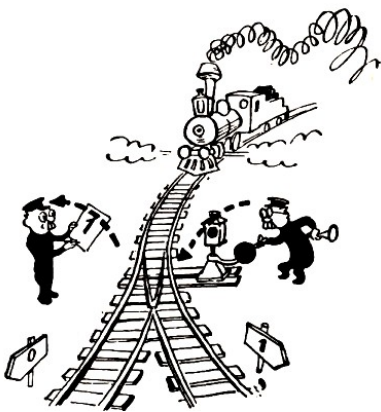


Bild 6.8.: Der Stellmeister, der den Zug auf eines von zwei Gleisen leitet, gibt einen Befehl von 1 bit, und der Weichenwärter, der meldet, wohin der Zug fährt, gibt eine Nachricht von 1 bit.

Werden dekadische Logarithmen verwendet, so ergibt sich ein anderes Maß - das Dezit, doch dieses Maß ist für die Praxis weniger geeignet.

In der Formel für die Anzahl der möglichen Fortsetzungen oder Ergebnisse eines Prozesses bildet die Länge der Kodewörter, d.h. die Anzahl der Einzelsignale, die zur Ansteuerung einer Fortsetzung oder Meldung eines Ergebnisses übermittelt werden müssen, den Exponenten der gewählten Basis (z. B. 2), die Anzahl der Einzelsignale wächst also wesentlich langsamer als die Anzahl der Fortsetzungen bzw. Ergebnisse.

Daher können mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Einzelsignalen schon komplizierte Verhältnisse und Beziehungen ausgedrückt werden.

Ein Automat bildet mit allen seinen Rückkopplungen, Verstärkern und Speichernein einheitliches System, bei dem alle Information zu einer Einheit verbunden ist. Auch die Ketten von Baueinheiten, die keine gemeinsamen Glieder haben, hängen voneinander ab, da sich eine Veränderung in einer beliebigen Kette auf den Zustand des gesteuerten Systems auswirkt und

damit auf den Zustand des Gesamtsystems.

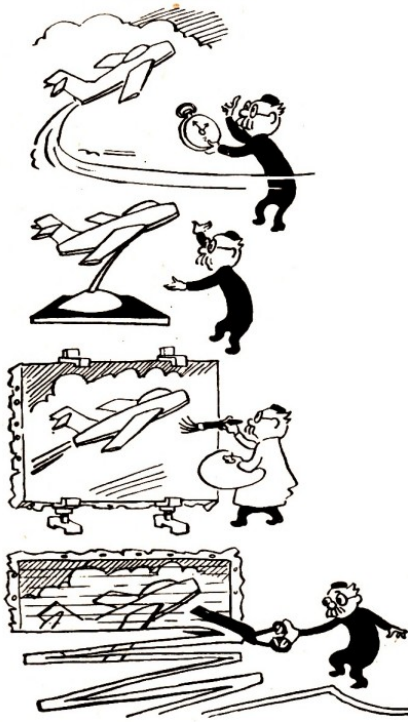


Bild 6.9.: Die ursprüngliche Information von einem fliegenden Flugzeug hat vier Dimensionen: drei räumliche und eine zeitliche. Die naturgetreue Nachbildung des Flugzeugs bleibt zeitlich konstant, sie hat drei Dimensionen, das Bild zwei. Das zweidimensionale Bild kann durch Umkodierung in ein eindimensionales Signal verwandelt werden. Die Umwandlungen in umgekehrter Richtung führen zu einer Vergrößerung der Anzahl der Dimensionen.

Ein direktes einfaches Verarbeiten von Signalen ist offensichtlich nur dann möglich, wenn diese in vergleichbaren Formen vorliegen. Versuchen Sie doch, sich vorzustellen, wie ein System mit Informationen aus einer Buchführung und einem Gedicht, aus einer Landschaftsmalerei und dem Beweis des pythagoreischen Satzes, aus einer Schachaufgabe und einem in Noten niedergeschriebenen Musikstück, aus der Bewegung eines Schlittschuhläufers und der Arbeit einer Fräsmaschine arbeiten soll!

Zunächst ist es notwendig, die Signale möglichst in die gleiche physikalische Form und mit den gleichen Einzelsignalen bzw. Signalwerten zu kodieren. Diese Operation heißt Umkodierung. Eine Vorrichtung, die die physikalische Form der Signale ändert, wird in der Technik Wandler genannt; in der Biologie sprechen wir auch von Rezeptoren. Ein Automat mit pneumatischer Steuerung verwandelt alle ihm eingegebenen Signale in Luftdruckänderungen, eine Maschine mit elektrischer Steuerung verwandelt sie in Schwankungen der elektrischen Stromstärke oder der Spannung und ein hochorganisiertes Lebewesen in Veränderungen des Zustandes seines Nervensystems.

Für die theoretische Analyse ist es sehr günstig, die Signale graphisch durch Kurven in einem bestimmten Koordinatensystem - oder durch Zahlen darzustellen.

Eine Umkodierung ist vielfach mit einer Veränderung der Dimensionen der Signale verbunden.

Bekanntlich hat unsere Welt vier Dimensionen, und sie verändert sich in allen ihren Dimensionen. Die zu kodierenden Signalkomplexe, d. h. Kombinationen von Signalen, können eine, zwei, drei oder vier Dimensionen haben: drei räumliche und eine zeitliche.

Ein Gegenstand (z. B. eine Skulptur) hat drei räumliche Dimensionen; eine unbewegliche flächenhafte Darstellung hat zwei Dimensionen; eine Filmvorführung oder eine andere bewegliche flächenhafte Darstellung drei Dimensionen, und zwar zwei räumliche und eine zeitliche, eine schriftliche Darstellung in Buchstaben oder Ziffern hat eine räumliche, eine sprachliche Mitteilung eine zeitliche Dimension.

Damit ist natürlich nicht gesagt, dass eine Skulptur nicht in der Zeit existiert und ein gesprochener Satz nicht im Raum, sondern nur, dass sich die betreffende Erscheinung in diesen Dimensionen nicht verändert (oder, wenn sie sich verändert, dass jene Veränderungen keine Informationen tragen).

Schon lange kennen Wissenschaft und Technik Methoden, die es ermöglichen, die Anzahl der Dimensionen mit Hilfe bestimmter Umwandlungen von Signalen einer Dimension in Signale

einer anderen zu verändern.

Wird z. B. ein räumlicher Gegenstand durch Projektion auf einem Zeichenblatt abgebildet, so wird die Anzahl der Dimensionen von drei auf zwei verringert, bei der Aufnahme eines Photos von einer realen Handlung von vier auf zwei; wenn wir ein Buch lesen, so wird das eindimensionale räumliche Signal in ein eindimensionales zeitliches Signal umgewandelt usw.

Diese Umwandlung wird häufig in einer solchen Weise durchgeführt, dass sie umkehrbar ist, d. h., dass man aus dem erhaltenen Signalkomplex den ursprünglichen wiederherstellen kann. Wenn bei einer solchen Umkodierung die Anzahl der Dimensionen verringert wird, ist allerdings eine Umkehrbarkeit im strengen mathematischen Sinne nur schwierig zu erreichen, im allgemeinen ist die Umwandlung mit einem Informationsverlust verbunden.

Aus einem Photo allein kann der Ablauf einer Handlung nicht in allen Einzelheiten abgelesen werden, ebensowenig wie aus der Projektion eines Gegenstandes dieser Gegenstand nicht vollständig zu erkennen ist: Wenn ich einen Zylinder parallel zu seiner Längsachse auf die Zeichenebene projiziere, entsteht ebenso ein Kreis, wie wenn ich eine Kugel auf diese Ebene projiziere.

Man kann aber den Informationsverlust bei praktischen Anwendungen immer relativ klein werden lassen. So ist der Informationsverlust, der entsteht, wenn ich eine reale Handlung durch einen Film ersetze, auf dem diese Handlung festgehalten wurde, im allgemeinen sehr klein - zumal dann, wenn es sich um einen Stereofilm handelt; dass er aber nicht gleich Null ist, zeigt die Tatsache, dass die übliche Laufgeschwindigkeit der Kinokameras zur Erfassung sehr schneller Bewegungen nicht ausreicht.

Mit anderen Worten: Die Kinokamera nimmt von einer Handlung nur soviel Informationen auf, wie das menschliche Auge angesichts der realen Handlung aufnehmen würde, aber nicht alle Information.

Die Beziehungen und Verhältnisse in der Welt verändern sich in der verschiedensten Weise. Alle diese Veränderungen können durch Signale mit beliebigen Dimensionen ohne wesentlichen Informationsverlust beschrieben werden.

Tragen wir z. B. in ein Koordinatensystem unsere Geldausgaben ein, d. h., auf der Abszissenachse markieren wir die Zeitpunkte und auf der Ordinate den Geldbetrag, der zu dem jeweiligen Zeitpunkt ausgegeben wurde, so erhalten wir ein Diagramm unserer Ausgaben. Diese Linie informiert uns mit genügender Zuverlässigkeit auch über Ausgaben, die nicht im einzelnen notiert wurden. Die Operation, mit Hilfe bekannter Werte fehlende Zwischenwerte zu ermitteln, heißt Interpolation.

Zum anderen kann man die Linie über die bekannten Werte hinaus verlängern, auch in den Bereich zukünftiger Daten; dies nennt man Extrapolation. Wenn die Linie z. B. nach oben weist, dann besteht Grund zur Annahme, dass eine Tendenz zur Vergrößerung der Ausgaben zu beobachten ist.

Doch eine große Informationsmenge aus der Vergangenheit belehrt uns vielleicht, dass bereits früher auf ein solches Ansteigen nach Erreichen eines bestimmten Maximalwertes wieder ein Absinken folgte. Wenn wir voraussetzen, dass der Prozess des Geldausgebens bestimmte konstante Eigenschaften hat, so können wir vermuten, dass die Ausgaben später wieder sinken werden.

Ebenso ist die Dynamik einer Buchführung beschaffen, deren Sinn in langen, einförmigen Ziffernkolonnen verborgen ist. Diesen Ziffernkolonnen sind eindeutig Diagramme zugeordnet, aus denen sich die Wirtschaftstätigkeit, die in der Buchführung zum Ausdruck kommt, deutlicher

entnehmen lässt.

Operationen mit den Diagrammen vermitteln uns Kenntnisse, die wir früher nicht besaßen, sie geben uns neue Information. Doch diese Information wird nicht etwa durch den Umwandlungsprozess erzeugt; vielmehr war sie in den bereits bekannten Daten enthalten und wurde nur in eine andere Form gebracht.

Auch hierbei entsteht ein gewisser Informationsverlust, da jede Interpolation - und erst recht jede Extrapolation - Unsicherheiten mit sich bringt.

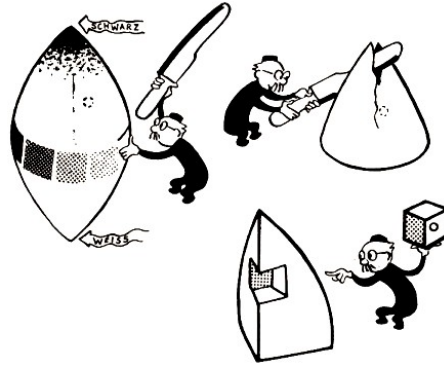


Bild 6.10.: Die stufenweise Teilung des "Farbenkörpers" in Stücke ist anderen Auswahlprozessen völlig analog. Sie ermöglicht, jede beliebige Farbe in der Sprache der Nullen und Einsen zu beschreiben.

Betrachten wir das Aquarell einer Landschaft, das nur in einer Farbe ausgeführt ist, etwa in schwarzer Tusche oder in Sepia. Information tragen hier die Unterschiede in der Sättigung der Farbe vom reinen Weiß bis zum tiefen Schwarz.

Zerlegt man das Bild in sehr schmale Streifen und fügt diese zu einem Band aneinander, so hat man den Inhalt des flächigen Bildes in eine eindimensionale Anordnung gebracht. Dieses Band lässt sich wiederum durch ein Diagramm der Farbsättigung darstellen. Dazu sind die Sättigungswerte auf der Ordinatenachse aufzutragen; diese Werte lassen sich z. B. durch Vergleich mit einer genormten Skale genau bestimmen.

Wenn wir die Streifen hinreichend schmal geschnitten haben, erscheint die gesamte Information, die im Landschaftsbild enthalten ist, nun in Form eines Diagramms. (Je schmaler die Streifen, um so kleiner ist der Informationsverlust.) Das malerische Häuschen, der Fluss und die bizarren Bäume erscheinen "aufgelöst" in einer gezackten und gekrümmten Linie.

Doch sei schon der erste Nutzen einer solchen Umwandlung, einer "Auflösung", genannt: Das Bild kann so mittels einer einzigen elektrischen Leitung übertragen werden, wobei den Veränderungen der Farbsättigung Veränderungen z. B. der Stromstärke entsprechen. Am anderen Ende der Leitung zeichnet ein Schreibgerät genau das gleiche Diagramm, aus dem wir das Bild zurückgewinnen können, wenn uns die beim Auflösen verwendete Skale der Farbsättigung, ferner Streifenzahl und -länge bekannt sind.

Wenn man Vergrößerungen und Verluste in manchen Details in Kauf nimmt, dann kann das Bild auch mit Hilfe eines gewöhnlichen Buchstabenfernsehers übertragen werden. Jedem Skalenwert kann ein bestimmter Buchstabe zugeordnet werden, denn schließlich sind die Buchstaben nichts anderes als Farbflecke komplizierter Form, und unter den Schriftzeichen einer Schreibmaschine gibt es solche, die dunkler (wie M, W, X, B, §, &) und solche, die heller (wie 0, I, 1) erscheinen; die Leertaste ergibt eine weiße - farbfreie - Stelle.

Dann wird z. B. eine Wolke am Himmel durch Leerstellen oder Einsen und der Schatten unter den Bäumen durch die Buchstaben M oder W wiedergegeben.

Schließlich könnte das Landschaftsbild auch mit Hilfe eines Morsetelegraphen übertragen werden, bei dem wir nur drei Zeichen zur Verfügung haben: Punkt, Strich und Zwischenraum (Leerstelle). Mit Hilfe dieser Elemente kann man das "Vorzeichen der Ableitung" für jeden Punkt des Diagramms übertragen: Punkt bedeutet Zunahme, Strich Abnahme, Zwischenraum Konstanz der Farbsättigung.

Dort, wo die Farbsättigung ständig zunimmt (wo die Kurve im Diagramm ansteigt), wird dann eine Folge von Punkten erscheinen, wo sie abnimmt, eine Folge von Strichen.

Abstufungen im Ansteigen oder Abfallen der Kurve im Diagramm kann man dadurch ausdrücken, dass in die Folge von Punkten Striche - oder, umgekehrt, in die Folge von Strichen Punkte eingestreut sind.

Was muss man machen, um ein mehrfarbiges Bild - mit blauem Himmel, grünen Bäumen usw. - auf einer Leitung zu übertragen?

Dazu ist es notwendig, für jeden Bildpunkt drei Farbcharakteristiken anzugeben. Durch die erste wird die Lage der gegebenen Farbe auf der linearen Skale der Grautöne "Schwarz - Weiß" bestimmt, durch die zweite die Lage der Farbe auf dem Farbkreis "Rot - Gelb - Blau - Violett - Rot" und durch die dritte der Anteil der "reinen" Farbe. z. B. der Farbe Rot, in Bezug auf den Grauton.

Die allgemeine Skale aller denkbaren Farben hat folglich drei Dimensionen; sie wird deshalb "Farbenkörper" genannt. Man kann sich den "Farbenkörper" als Spindel vorstellen, bei der ein Ende schwarz und das andere weiß ist und die ringsherum die genannten Regenbogenfarben zeigt.

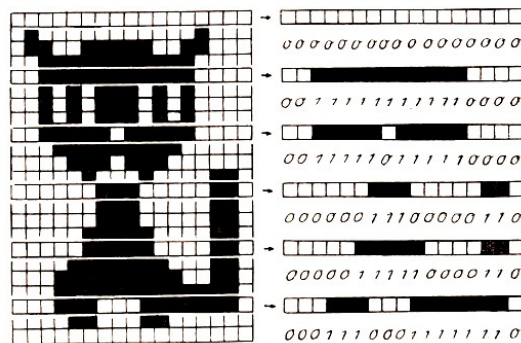


Bild 6.11.: Äußerlich nicht übereinstimmende Signale (z. B. Abbildungen und Ziffernfolgen) können auf die verschiedenste Weise ineinander umgewandelt werden. So kann das Bild einer Katze mit Hilfe von Nullen und Einsen übertragen werden.

Zu jeder beliebigen Farbe gehört ein bestimmter Punkt im Inneren des Farbenkörpers. Die Auswahl des Punktes kann nun genauso beschrieben werden wie die Auswahl eines Gleises auf dem Bahnhof: durch eine Kombination von Nullen und Einsen.

Wir denken uns den Farbenkörper in zwei Hälften zerlegt und überlegen nun: In welchem Teil ist "unsere" Farbe zu finden, rechts oder links? Je nachdem, zu welchem Ergebnis wir kommen, schreiben wir eine 0 oder eine 1 hin und halbieren den Restkörper, der unsere Farbe enthält, aufs Neue und stellen wiederum die Frage, in welcher Hälfte unsere Farbe liegt. Die Antwort notieren wir wieder in Form einer 0 oder 1.

Diesen Prozess setzen wir solange fort, bis die Farbe durch das Kodewort mit einer für unsere Zwecke hinreichenden Genauigkeit bestimmt ist.

Alle Umwandlungen des Landschaftsbildes, von denen die Rede war, würden, falls sie von



einem Menschen ausgeführt werden sollten, sehr viel Zeit in Anspruch nehmen und auch sehr ermüdend sein. Es ist aber möglich, das alles maschinell zu tun.

Drei mit Photoelementen versehene, schnell und synchron laufende Wandler, ein Übertragungskanal und eine Vorrichtung, die Farbe auf ein Papier aufträgt, können das Bild rasch und - falls es gelänge, alle Einzelheiten genügend fein in Streifen und Punkte zu gliedern - ohne Informationsverlust übertragen.

Eine ähnliche Umwandlung in Standardcodes - in Stromstärken, in ein Diagramm, in eine Folge von Nullen und Einsen - und umgekehrt ist auch bei Schachaufgaben, bei Musikstücken, bei beliebigen Bewegungen - schlechthin bei jedem Signal - möglich.

Ein Signal kann kontinuierlich oder diskontinuierlich (diskret) sein. Der Ton einer Sirene oder eine Photographie sind kontinuierliche Signale. Buchstaben, Ziffern, aus Punkten zusammengesetzte Zeichnungen gehören zu den diskreten Signalen, nämlich solchen Signalen, die sich als Anordnung von getrennten Signalwerten auffassen lassen.

Ein kontinuierliches Signal lässt sich dagegen in keiner derartigen Form zerlegen, es bildet etwas Zusammenhängendes. Bei einem kontinuierlichen Signal wird die Information jeweils vom Augenblickswert des Signals getragen. Von diesen Werten gibt es unendlich viele, aber zwischen ihnen besteht ein Wahrscheinlichkeitszusammenhang:

Die Wahrscheinlichkeit einer sehr großen Veränderung eines Signalwertes in einem sehr kleinen Zeitabschnitt ist gering. Die Informationsmenge, die ein kontinuierliches Signal während einer kleinen Zeitspanne vermittelt, ist daher im allgemeinen klein.

Man kann beweisen, dass jedes kontinuierliche Signal ohne Informationsverlust durch ein diskretes oder binäres Signal kodiert werden kann, wenn man einen "Quantelungsschritt" (den Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten, die bei der Umwandlung berücksichtigt werden) wählt, der den Informationsaufnahme-möglichkeiten des Systems angepasst ist, das diese Informationen verarbeiten soll.

Diesem Beweis liegt ein Satz zugrunde, der im Jahre 1933 von W. A. Kotelnikow gefunden wurde.

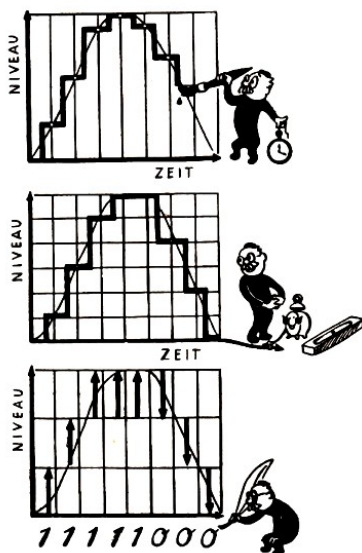


Bild 6.12.: Jede Veränderung, d. h. jeder Prozess, kann in Form eines kontinuierlichen Diagramms dargestellt werden. Doch sind kontinuierliche Signale nicht für jede Umwandlung gut geeignet. Daher werden Signale gequantelt, wobei nur die Signalwerte zu bestimmten Zeitpunkten, deren Abstand Quantelungsschritt heißt, erhalten bleiben (Quantelung nach der Zeit, siehe oberes Bild). Es ist auch möglich, zusätzlich das Niveau der betreffenden Größe zu quanteln - (Quantelung nach der Zeit und dem Niveau, siehe Bild, Mitte). Man kann sich aber auch darauf beschränken, die Richtung der Veränderung des Signalwertes anzugeben, und zwar in den Quantelungsschritten. Dann erhalten wir ein deltagewanteltes Signal, das für verschiedene Umwandlungen sehr geeignet ist.

Die Umwandlung eines kontinuierlichen Signals in ein diskretes wird Quantelung genannt und die Umwandlung in ein binäres Signal Delta-Quantelung oder Delta-Modulation.

Unter den Umkodierungen diskreter Signale durch binäre (also diskrete) Signale ist jene beson-

ders ausgezeichnet, die zu einem binären Signal führt, dessen Signalwerte angeben, ob und wie sich die Signalwerte des beschriebenen diskreten Signals ändern. Diese Umkodierung besitzt gegenüber anderen zahlreiche praktische Vorzüge.

Die Anzahl der diskreten (z. B. binären) Einzelsignale, die sich bei der Umwandlung eines kontinuierlichen Signals ergeben, hängt nicht nur von der Informationsmenge ab, die von diesem Signal übertragen wird, sondern auch von der Größe des Quantelungsschrittes.

Dieselbe Informationsmenge kann durch eine mehr oder weniger große Anzahl von Einzelsignalen übertragen werden. Das Verhältnis der Informationsmenge, die mittels des betreffenden diskreten Signals übertragen wird, zur Anzahl der Einzelsignale, aus denen sich dieses diskrete Signal zusammensetzt, ist ein wesentliches qualitatives Merkmal des Signals; es wird Informationsgehalt genannt.

Wird bei der Quantelung eines kontinuierlichen Signals der Quantelungsschritt vergrößert, so verringert sich die Anzahl der Einzelsignale. Solange die Größe des Quantelungsschrittes eine gewisse Grenze nicht überschreitet, verkleinert sich dabei die übertragene Informationsmenge nicht, sie ist mit weniger Einzelsignalen übertragen, d. h. gehaltvoller kodiert, sozusagen verdichtet werden.

Erst wenn die Größe des Quantelungsschrittes diese Grenze überschreitet, die durch die Aufnahmefähigkeit des Systems bestimmt ist, das die vom gegebenen kontinuierlichen Signal übertragene Information zu verarbeiten hat, dann geht bei der Quantelung ein Teil der ursprünglich vorhandenen Information verloren.

Solche nichtumkehrbaren Umwandlungen von Signalen kann man informationsverdichtende Umwandlungen nennen. Von großer praktischer Bedeutung wäre es, wenn man eine Anlage konstruieren könnte, die eine informationsverdichtende Umkodierung von Signalen durchführt, bei der von der übertragenen Information nur das Wesentliche übrigbleibt, die unwesentlichen und überflüssigen Einzelheiten dagegen verlorengehen.

Ein Künstler, der ein Landschaftsbild malt, verdichtet die Information über eine wirkliche Landschaft. Er eliminiert die Zeit, er wandelt den Zeitablauf also nicht wie eine Filmkamera in ein räumliches Nebeneinander um, sondern greift sich nur einen bestimmten Augenblick aus dem Leben der Landschaft heraus. Er eliminiert auch die dritte räumliche Dimension, die Tiefe; er fertigt also nicht zwei Bilder wie eine Stereokamera an, sondern beschränkt sich auf die zweidimensionale Darstellung der Tiefe durch die perspektivische Verkleinerung der Gegenstände und Unschärfen in der Ferne.

Er eliminiert eventuell auch die natürlichen Farben der Landschaft und setzt sie in Abstufungen von Grautönen um. Eine genaue Wiedergabe aller in der Landschaft vorhandenen Informationen ist ihm nicht möglich.

Dies kann im allgemeinen auch von einer Maschine ausgeführt werden, beispielsweise von einem ganz gewöhnlichen Photoapparat.

Die Maler der alten Schule, besonders die Niederländer vor Rembrandt, strebten eine sehr genaue Wiedergabe aller Einzelheiten an, die im potentiellen Bild - der Natur - vorhanden waren. Betrachtet man ihre Gemälde, so findet man immer wieder neue Einzelheiten.

Die Maler der Gegenwart stehen der Natur informationsverdichtend gegenüber, sie betonen das Wesentliche und weisen den Vorwurf des "Photographismus" von sich. Aber sie sind sehr erstaunt, wenn sie erfahren, dass auch Maschinen informationsverdichtende Umwandlungen vornehmen können, wenn auch heute noch nicht in demselben Maße wie der Mensch.

Schon das Fernsehen gibt uns hierfür ein anschauliches Beispiel. Gegenwärtig wird das Bildfeld in rund 500000 Bildpunkte zerlegt; das ist wesentlich gröber als die normale Sehschärfe im Gelben Fleck des menschlichen Auges<sup>24</sup>.

An einem Fernsehbild lassen sich darum auch keine feinen Einzelheiten unterscheiden, sie werden gar nicht erst übertragen. Weil diese Tatsache bei der Aufnahme berücksichtigt wird, stört diese Vergrößerung im allgemeinen kaum. Die ersten Fernsehsysteme hatten eine noch bedeutend geringere Bildpunktzahl. Die mit diesen Systemen übertragenen Bilder waren so grob, dass alle Gegenstände aus Würfeln aufgebaut schienen. Aber der Gesichtssinn der Menschen passte sich auch dieser unvollkommenen Technik an, und die "Grobschlächtigkeit" der Bilder störte relativ wenig.

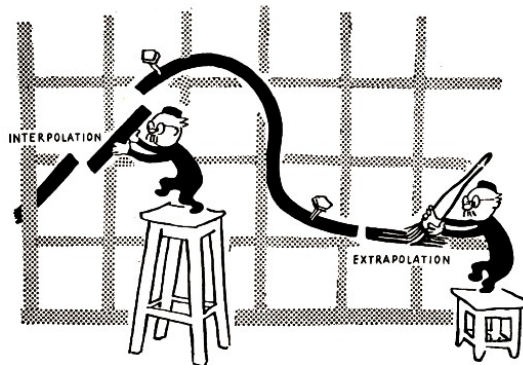


Bild 6.13.: Interpolation und Extrapolation gehören zu den wichtigsten Informationsumwandlungen.

Wir erhalten Informationen über Daten, die nicht zu den Ausgangswerten gehören. Doch diese Informationen entstehen keineswegs aus dem Nichts, sondern aus den Ausgangswerten.

Überraschende Ergebnisse entstehen bei einer solchen Umkodierung von Abbildungen, die mit einem sehr großen Quantelungsschritt arbeiten (z. B. kann man die Farbsättigungsskale in drei Stufen gliedern: Weiß - Grau - Schwarz, oder sogar in nur zwei Stufen: Weiß - Schwarz). Ein Landschaftsbild, das auf diese Weise umkodiert wurde, wirkt sehr stark verallgemeinert, ähnlich einem Kupferstich.

Wird nicht die Farbsättigung, sondern die Geschwindigkeit ihrer Veränderung innerhalb der einzelnen Zeilen - d.h. die Ableitung - in zwei Stufen ("Schwarz- Weiß") gequantelt, so erhalten wir ein durchaus unerwartetes Ergebnis.

Wo hat die Ableitung ihre größten Werte? Dort, wo Dunkel und Hell aneinandergrenzen, z. B. an den Begrenzungen der abgebildeten Gegenstände. Es entsteht also ein Bild, das in schwarzer Farbe die Konturen der Gegenstände zeigt, eine Umrisszeichnung der Landschaft, ähnlich der Bleistiftzeichnung, die jeder Maler anfertigt, bevor er die Farben aufträgt.

Die Abbildungen in diesem Buch sind Schwarzweißzeichnungen. Die Gegenstände haben in Wirklichkeit jedoch verschiedene Farben und keine schwarzen Konturen.

Der Illustrator hat ebenfalls die räumlichen Beziehungen der abgebildeten Gegenstände unterdrückt: Das Männchen, das wir "Informatius" nennen wollen, hat einen viel zu großen Kopf und zu kurze Beine; verglichen mit einigen Dingen ist es zu groß, mit anderen Dingen ist es zu

<sup>24</sup>Es würde übrigens für eine "natürliche" Fernsehübertragung nicht genügen, wenn die Zahl der Punkte, aus denen sich das Fernsehbild aufbaut, gleich der Zahl der Bildpunkte wäre, die der Gelbe Fleck des menschlichen Auges unterscheiden kann: denn der Gelbe Fleck erfasst einen weit kleineren Bildausschnitt als die Fernsehkamera. Das Auge wird aber durch unwillkürliche Bewegungen so geführt, dass schnell aufeinander folgend ständig neue Abschnitte des Bildes mit dem Gelben Fleck abgetastet werden. Daher ist der Bereich, in dem feine Einzelheiten erkannt werden können, wesentlich größer, als es der Ausdehnung des Gelben Flecks entspricht.

klein. Das stört nicht, sondern hilft dem Leser: Er wird auf das Wesentliche hingewiesen und vom Unwesentlichen abgelenkt.

Der Illustrator ließ sich bei seiner Arbeit von allgemeinen Kodierungsprinzipien leiten. Er hat die Information gleichmäßig auf die Signale verteilt, d. h., er ordnete solchen Teilen der Nachricht möglichst viele Signale zu, die für den Leser neu, überraschend und wenig wahrscheinlich sind, und bemühte sich umgekehrt, bei selbstverständlichen und bekannten Dingen mit einem Minimum an Signalen auszukommen, und das ohne wesentlichen Informationsverlust.

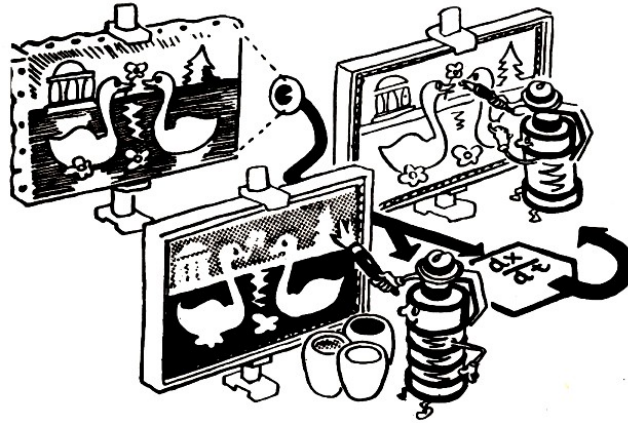


Bild 6.14.: Die Umwandlung eines Bildes mit Farb- und Sättigungswerten in eine Konturendarstellung kann durch ein nichtlineares Glied, einen Differentiator, erfolgen.

Wir haben schon gesehen, dass Wahrscheinlichkeit und Information in einem engen Zusammenhang stehen. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn solche Zusammenhänge auch bei der Konstruktion informationsverdichtender Codes eine Rolle spielen.

Genaugenommen gibt es in der Welt nur wenige Prozesse, deren Entwicklungslinien sich in bestimmten Punkten so einfach verzweigen wie die Gleise auf dem Bahnhof, von dem oben die Rede war. Sogar eine Eisenbahnweiche, der der Befehl "Richtung ändern" gegeben wird, erhält nicht unbedingt eine Information von genau 1 bit.

Führt z.B. diese Weiche von der Hauptstrecke auf ein totes Gleis, so ist die Stellung "Hauptstrecke" viel häufiger und darum, auch viel wahrscheinlicher als die andere Stellung "totes Gleis", d. h., der Befehl "totes Gleis" trägt mehr Information als der Befehl "Hauptstrecke". Diese theoretische Überlegung hat interessante Anwendungen:

Wenn wir einen Bahnhof mit sehr vielen Weichen und Gleisen haben, dann ist die Anzahl der Möglichkeiten für einen in den leeren Bahnhof einfahrenden Zug sehr groß. Wenn wir ihn auf ein bestimmtes Gleis leiten wollen, müssen wir unter Umständen eine ziemlich große Anzahl von Einzelbefehlen geben.

Wenn wir z. B. 32 Weichen haben und alle Weichen gleichzeitig schalten, so können wir, wie wir oben gesehen haben, jede Weichenstellung mit 5 Einzelbefehlen herstellen. Es ist aber viel ökonomischer, wenn wir es so einrichten, dass für die wenig wahrscheinlichen Weichenstellungen 6 oder 7 Einzelbefehle, für die häufigen (und wahrscheinlichen) dagegen nur 2 oder 3 erforderlich sind. Das erreicht man durch eine zweckmäßige Anordnung der Weichen.

Die Gesamtzahl der Einzelbefehle, die während eines Tages gegeben werden, verringert sich auf diese Weise, und die Arbeit im Stellwerk wird wirtschaftlicher und sicherer.

Gewöhnlich gibt es neben der wahrscheinlichsten Fortsetzung eines Prozesses noch eine Menge, ein "Feld" von Fortsetzungen geringerer Wahrscheinlichkeit. Eine Kugel, die auf einer schiefen

Ebene herabrollt, bewegt sich längs einer Falllinie dieser Ebene; Rauigkeiten an der Oberfläche und andere Einflüsse können sie von dieser Linie ablenken.

Die Nachricht, dass sich die Kugel längs der Falllinie bewegt, trägt fast keine Information; denn das ist das wahrscheinlichste Ergebnis, und es bedarf keines steuernden Befehls, um die Kugel auf diese Bahn größter Wahrscheinlichkeit zu lenken.

Je komplizierter (unwahrscheinlicher) die Bahn der Kugel ist, desto komplizierter ist auch deren Beschreibung und desto mehr Befehle werden benötigt, um die Kugel diese Bahn durchlaufen zu lassen.

Deshalb gründet sich die Messung (die qualitative Erfassung) von Informationen auf die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Diesen Standpunkt, der zuerst im Jahre 1928 von dem Ingenieur R. Hartley<sup>25</sup> vorgeschlagen wurde, hat der amerikanische Wissenschaftler Claude Shannon<sup>26</sup> aufgegriffen und in den Jahren 1944 bis 1947 weiterentwickelt.

Während des Krieges beschäftigte sich Shannon mit der Entschlüsselung abgefangener chiffrierter Funksprüche. Die Zeichen - Buchstaben und Ziffern, Punkt- und Strichreihen - traten nicht mit ihren gewöhnlichen Häufigkeiten auf; diese waren durch ausgeklügelte Chiffrierungsverfahren verändert worden.

Shannon ging davon aus, dass der Sinn des Funkspruchs bei allen diesen Umwandlungen erhalten bleibt und sich deshalb als Beziehung zwischen den statistischen Eigenschaften des betreffenden Kodes und dem Inhalt der Nachricht zeigen muss.

Daraus entstand die mathematische Theorie der Information, in deren Ergebnis auch exakte, quantitative Definitionen solcher psychologischer Begriffe wie "Neuigkeit", "Überraschung", "Sensation", "Eindruck" u. ä. gegeben werden konnten.

In der Tat berühren die Ergebnisse dieser Theorie komplizierte und aktuelle Probleme der menschlichen Tätigkeit und ermöglichen es selbst dann, wenn es kaum möglich erscheint, diese mathematisch zu erfassen.

Weshalb erregen phantastische Nachrichten über Schneemenschen, fliegende Untertassen oder über menschenfressende Bäume; die unvorsichtige Wanderer mit ihren beweglichen Wurzeln einfangen, das Interesse der Öffentlichkeit? Warum erfahren die häufig schablonenhaften Kriminalromane mit ihren Verbrechen und Detektiven, mit Verfolgungsjagden und Maskierungen so hohe Auflagen?

Allein die geringe Wahrscheinlichkeit der dargestellten Situationen erweckt hier den Anschein einer großen Informationsmenge. Ein Urlauber, der am Meeresstrand Steine sammelt, liest vor allem solche auf, die sich von den anderen unterscheiden. Zu Hause stellt sich dann heraus, dass sie alle einander ähneln, und sein Interesse daran schwindet rasch.

Andererseits weiß jedermann, dass die Anzahl der Wörter eines Buches oder einer Lektion keineswegs die Vielfalt und die Tiefe des Inhalts bestimmt; vielmehr gilt: "In der Kürze liegt die Würze."

Der Text dieses Buchs ist eine Folge von etwa 1000000 Zeichen (Einzelsignalen), nämlich großen und kleinen Buchstaben, Ziffern, Satzzeichen, mathematischen Symbolen und Leerstellen (Zwischenräumen). Jedes dieser Zeichen kann im Idealfall eine Informationsmenge von etwa 6 bit vermitteln.

---

<sup>25</sup>R. L. v. Hartley: Informationsübertragung. Die Informationstheorie und ihre Anwendung.

<sup>26</sup>C. Shannon: Mathematische Theorie der Nachrichten. Theorie der Übertragung elektrischer Signale bei Vorhandensein von Störungen.

Warum? Weil es ungefähr 64 verschiedene Zeichen der angegebenen Art gibt. Wenn der Autor auf seiner Schreibmaschine eines dieser Zeichen anschlägt, so wählt er unter 64 Möglichkeiten aus; da der Logarithmus zur Basis 2 von 64 gleich 6 ist, enthält die Nachricht über diese Auswahl, d. h. das geschriebene Zeichen, eine Information von 6 bit.

Zwei Zeichen müssen demnach eine Information von 12 bit vermitteln, drei eine von 18 bit und das ganze Buch eine Information von 6 Millionen bit. Das ist aber nicht der Fall, unser Buch enthält eine wesentlich kleinere Informationsmenge.

Zum einen können die einzelnen Zeichen in einem sinnvollen deutschsprachigen Text nicht beliebig aufeinander folgen, die Kombinationen „qt“, „wxd“, „sz“ z. B. kommen (von Formeln und Abkürzungen einmal abgesehen) niemals vor. Zum anderen besitzen die einzelnen Zeichen in sinnvollen deutschsprachigen Texten unterschiedliche Häufigkeiten, d. h., die Wahrscheinlichkeiten ihres Auftretens sind verschieden und damit auch die von ihnen vermittelten Informationsmengen. In deutschen Texten kommen (von der Groß- und Kleinschreibung einmal abgesehen) die Buchstaben „e“, „r“, „n“ beispielsweise wesentlich häufiger vor als die Buchstaben „q“, „x“, „y“. Von diesen Buchstaben wird also mehr Information vermittelt als von den Buchstaben „e“, „r“, „n“.

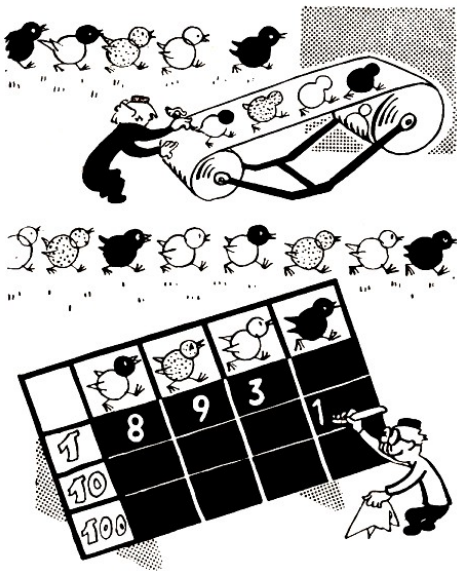


Bild 6.15.: Letzten Endes gibt es fast immer eine Möglichkeit, bei Aufzeichnungen überflüssige, für die Untersuchung unwesentliche Einzelheiten fortzulassen und dadurch das Verfahren abzukürzen. Anstatt alle Küken einzeln abzuzeichnen, kann man eine Tabelle anlegen.

Wieviel Information ein einzelnes Zeichen vermittelt, hängt aber auch von seiner Stellung im Wort, im Satz, ja sogar im ganzen Buch ab.

Der Punkt, der den letzten Satz dieses Buches abschließt, trägt zum Beispiel überhaupt keine Information. Das erste „e“ im Wort "Tresse" trägt mehr Information als das letzte, denn auch "Trosse" und "Trasse" sind sinnvolle Wörter, während das letzte „e“ nicht so durch einen anderen Buchstaben ersetzt werden kann, dass ein sinnvolles neues Wort entsteht.

Im Jahre 1961 hat A. N. Kolmogorow experimentell nachgewiesen, dass die von einem Buchstaben eines russischen Textes vermittelte Informationsmenge von seiner Stellung innerhalb des Wortes, des Satzes und auch innerhalb des Buches abhängt.

Dazu untersuchte er jeden einzelnen Buchstaben eines wenig bekannten Kapitels aus einer Erzählung von S. Aksanow. Ein Mitarbeiter musste erraten, welcher Buchstabe dem jeweils vorgelesenen folgt. Oft konnte der Mitarbeiter ganze Wortendungen oder den Schluss ganzer Sätze erraten: Das bedeutet, dass sie keine Information tragen.

Die Satzanfänge, die Wortanfänge und teilweise auch die Wortendungen tragen also vielfach mehr Information als die Satzenden und die Buchstaben in der Mitte der Wörter. Ähnliches gilt für die deutsche Sprache.

Deshalb verwenden wir auch solche Abkürzungen wie d. J. (dieses Jahres), MDN (Mark der Deutschen Notenbank), Ing. (Ingenieur), Dr. (Doktor), Krad (Kraftrad), Whs. (Wirtshaus). Ein Schriftsteller beginnt dagegen sein Buch und die einzelnen Kapitel im allgemeinen mit

bekanntesten Dingen, erst in den "mittleren" Teilen bringt er dann die neuen weniger wahrscheinlichen Gedanken, d. h. die eigentlichen Informationen.

Im oben erwähnten Versuch wurden von einem Text mit etwa 100 Wörtern mehr als die Hälfte dieser Wörter erraten. Es ergab sich dabei, dass der Mitarbeiter von den 535 bit, die ihm angeboten wurden, 325 bit durch seine Kenntnis der russischen Sprache und ihrer Regeln bereits besaß, dass es also möglich gewesen wäre, auf etwa die Hälfte der Buchstaben zu verzichten. Als der Versuch begann, hatte der Mitarbeiter Kolmogorows keinerlei Vorstellung vom Inhalt des Textes und auch kein besonderes Interesse an diesem Text; anderenfalls hätte er vielleicht noch mehr erraten können.

In unserem Buch sind sicherlich weniger als 2 Millionen bit Information enthalten.

Davon ist - wie ich annehme - etwa ein Viertel überflüssig, weil diese Informationen nicht unbedingt zum behandelten Gegenstand gehören, mehrfach vorhanden sind usw. Wäre das Manuskript verlorengegangen, so hätte der Autor mit dem gleichen Aufwand die gleichen Gedanken, Folgerungen und Fakten ohne Qualitätseinbuße darlegen können, nur mit anderen Worten.

Die Auswahl der vorliegenden Ausführung des Buches aus einer sicher großen Anzahl möglicher, gleichfalls befriedigender Ausführungen ist zufällig; sie trägt keine Information.

Ein sturer und langlebiger Verlagslektor könnte dem gleichfalls langlebig, zudem als geduldig und gutmütig voraussetzenden Autor die Aufgabe stellen, das Manuskript so oft neu zu schreiben, bis sich zwei dieser Varianten wortwörtlich decken.

Dann könnte er aus der Gesamtzahl der gleichwertigen Varianten die Größe der Entropie (die Unbestimmtheit im Aufbau des Buches) errechnen und dementsprechend für - sagen wir - 500000 bit Honorar abziehen, also nur die "echte" Informationsmenge von etwa 1,5 Millionen bit honorieren. Unter diesen 1,5 Millionen bit sind, so hoffe ich, etwa 100 bit solcher Information, die es sonst noch nirgends auf der Welt gibt.

Aber diese Information ist nicht vom Autor "geschaffen" worden, sondern sie spiegelt reale, objektiv bestehende Zusammenhänge in der Welt wider, die einfach bisher von niemandem bemerkt worden sind. Die übrige Information ist wahrscheinlich schon in anderen Schriften oder im Gedächtnis von Kybernetikern und anderen Wissenschaftlern vorhanden. Für diesen Personenkreis mag das Buch auch langweilig, episch breit und inhaltsarm erscheinen, denn von den 6 Millionen Informationseinheiten sind nur 100 neu für ihn.

Wenn der Autor wie Lukrez in Gedichtform geschrieben hätte, so wäre die Unbestimmtheit im Aufbau des Buchs wahrscheinlich wesentlich kleiner. Eine ungeheure Anzahl der möglichen Varianten wäre allein durch die Bedingung, in Versform und Metrik zu schreiben, ausgeschaltet worden.

Schließlich vermittelt das Buch dem Autor, wenn er wirklich selbst alles weiß, was er geschrieben hat, und nicht mechanisch aus irgendwelchen Büchern abgeschrieben hat, wie es leider auch vorkommt, keine neuen Gedanken. Das entspricht vollkommen dem Erhaltungsgesetz:

Der Autor wendete nur eine Kette von Signalwandlern an: seine Hände, den Füllfederhalter, schließlich Setz- und Druckmaschine. Diese verändern die Informationsmenge, die in seinem Gedächtnis gespeichert ist, nicht.

Um zu bestimmen, welche Informationsmenge in einem Buchstabenwortsignal von 1 Million Buchstaben enthalten ist, müssen wir, die Qualität dieses Signals, seinen Informationsgehalt für den gegebenen Zweck ermitteln, d. h. die Informationsmenge, die auf die Einzelsignale, d.

h. auf die einzelnen Buchstaben und Zeichen, entfällt.

Dazu ist es notwendig, die Sprache zu untersuchen, zu erforschen, welche Buchstaben und Zeichen häufiger und welche seltener auftreten. Ferner muss festgestellt werden, wieviel Wörter und Begriffe gebraucht werden und ob die Wörter dabei kurz oder lang sind.

Das Wort "Begriff" hat in der deutschen Sprache eine bestimmte Bedeutung, das Wort "Gebriff", das die gleichen Buchstaben, manche davon sogar in gleicher Anordnung enthält, ist dagegen sinnlos. Wir werden erstaunt feststellen, dass in unserer Sprache mehr als die Hälfte der Einzelsignale eigentlich Ballast sind, allerdings nicht, wie wir später noch sehen werden, gänzlich nutzloser Ballast.

Wenn wir von Lauten zu Wörtern, von Wörtern zu Sätzen und zu ganzen Texten übergeben, finden wir jedesmal Wiederholungen und innere Abhängigkeiten zwischen den Einzelsignalen. Sie verringern die Informationsmenge, die ein Text gleichen Umfangs tragen könnte, sie setzen seinen Informationsgehalt herab. Diese Wiederholungen und Abhängigkeiten zu beseitigen, den Informationsgehalt zu erhöhen, ist eine äußerst wichtige Operation, die von den informationsverarbeitenden Automaten ausgeführt wird.

Solange es sich um die relative Häufigkeit von Lauten und kürzeren Lautverbindungen handelt, ist die Sache ziemlich einfach. Schließlich können wir eine ausgeklügelte Sprache ersinnen, in der jede beliebige Buchstabenkombination - z. B. „aty“, „wxd“, „sz“ - einen Sinn hat, ähnlich wie bei der Typenbezeichnung von Maschinen.

Doch wird dann jedes der aus drei Buchstaben bestehenden Wörter auch eine Information von 18 bit tragen? Offensichtlich nicht, weil die Wörter nicht gleich häufig vorkommen, sondern verschiedene Wahrscheinlichkeiten haben dürften; für Wortgruppen gilt das in noch höherem Maße.

Wenn „aty“ Dinosaurus und „wxd“ Integral bedeutet, dann tritt die Wortgruppe „aty wxd“ in einem sinnvollen, informationstragenden Text nicht auf, ihre Wahrscheinlichkeit ist gleich Null. Mögliche, doch seltene Wortgruppen tragen mehr Information als häufige, stereotype Gruppierungen. Wortgruppen, die bestimmten Wörtern zwangsläufig folgen, tragen ebenfalls keine Information, man kann sie daher abkürzen oder streichen.

Wir haben gesehen, dass Signale so kodiert werden können, dass dabei der Informationsgehalt zunimmt. Diese "Verdichtung" braucht nicht mit einem Verlust an Information verbunden zu sein. Wird jedoch die Verdichtung über ein gewisses Maß erhöht, z. B. bei der Umwandlung eines kontinuierlichen Signals in ein diskretes durch übermäßige Vergrößerung des Quantelungsschrittes, dann sind Verluste unvermeidlich.

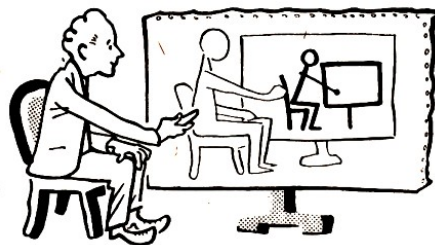


Bild 6.16.: Das Ersetzen einer Zeichnung durch eine Skizze erhöht die Informationsdichte.

Es ist eine wichtige Aufgabe, solche informationsverdichtenden Signalumwandlungen zu finden, bei denen nur "unwesentliche" Informationen verlorengehen, d. h. solche Informationen, über die der Empfänger - zumindest teilweise - schon verfügt. Die zu übertragende Informationsmenge wird dabei durch "Weglassen" unwesentlicher Einzelheiten vermindert — diese



Einzelheiten muss sich der Empfänger "hinzudenken".

Abgesehen davon, dass es unökonomisch ist, "zuviel" Informationen zu übertragen, haben die Kanäle zwischen den Informationspotentialen stets nur eine begrenzte Durchlassfähigkeit. Ein Automat ist um so vollkommener, je größer seine Fähigkeit ist, die bereits aufgespeicherte Information dazu zu verwenden, aus wenigen Informationen, die ihn aus seiner Umwelt erreichen, die für ihn wichtigsten Veränderungen in der Umwelt zu erkennen und entsprechend darauf zu reagieren.

Besitzt ein Automat diese Fähigkeit, dann kann ein Einzelsignal, z. B. der Buchstabe „A“, eine große Informationsmenge übertragen. Sie können mit einem Freund, der sich in einer anderen Stadt um ein Studium bewirbt, vereinbaren, dass er, falls er an der Hochschule angenommen ist, ein Stipendium und ein Zimmer erhalten hat, Ihnen dies an einem bestimmten Tag durch ein Telegramm allein mit dem Buchstaben „A“ mitteilt. Für Sie wird dieses Telegramm das gleiche bedeuten wie für einen anderen ein ganzer Brief.

Dabei trägt dieses Telegramm für Sie nicht einmal 6 bit Information wie der Buchstabe allgemein, sondern bestenfalls 1 bit, da es nur die Unbestimmtheit von 1 bit "ich erhalte ein Telegramm" - "ich erhalte kein Telegramm"- beseitigt.

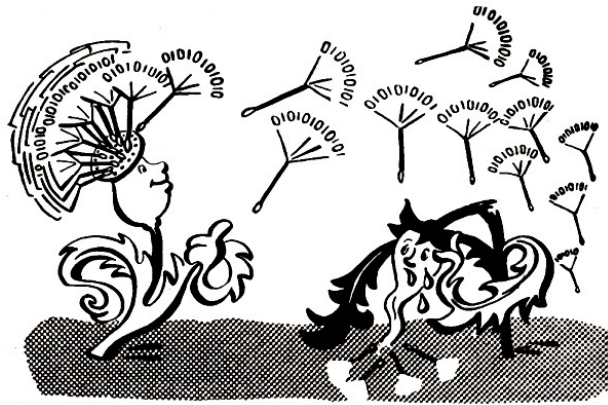
Und wenn Sie die Fähigkeiten Ihres Freundes und damit die Wahrscheinlichkeit, dass er an der Hochschule angenommen wird, bereits früher eingeschätzt haben, so dass die beiden Möglichkeiten - "ich erhalte ein Telegramm" - "ich erhalte kein Telegramm" verschiedene Wahrscheinlichkeiten besitzen, dann ist die vom Eintreffen jeder dieser Möglichkeiten vermittelte Information verschieden groß.

In informationsverarbeitenden Systemen werden Informationen in großem Maßstab so umgewandelt, dass sich Unbestimmtheiten von 1 bit ergeben, dass die kategorische Frage "ja oder nein" gestellt und beantwortet werden kann. So treffen Verliebte ihre Wahl, so wird das Experiment des Physikers, der die Naturgesetze erforscht, angelegt und so werden Abstimmungen durchgeführt.

"Hängt die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von der Relativgeschwindigkeit zwischen der Lichtquelle und dem Beobachter ab?" fragte der Physiker Michelson die Natur, als er seinen berühmt gewordenen Versuch anstellte.

Und die negative Antwort auf diese Frage veranlasste Einstein, die Grundlagen der Physik seiner Zeit, eine ungeheure Informationsmenge in verallgemeinerter Form, kritisch zu betrachten. Hieraus folgt, dass es neben dem Mengenmaß noch ein Wertmaß für die Information geben muss, das wir im weiteren untersuchen wollen.

## 7 Die Informationssammlung, sie bedeutet Fortschritt, Entwicklung, Vervollkommnung



Turings mechanischer Pedant - Einschränkungen der Auswahl, die für nachlässige Schüler von Nutzen sind - Die in der Stadt der Lügner entdeckte Theorie vom Wert der Information - Die Information erfordert Vollständigkeit - Ein regelmäßiger, aber einfacher Kristall, das ist der Anfang der "inversen Statistik" - Katalyse - Steuerung des Tanzes der Moleküle - Das Leben wählt das Urmeer auf - Nukleoproteide - Stoffe mit einem riesigen Gedächtnis - Kybernetik und Biologie.

Erheben wir die These, dass Information nur aus Information entsteht und dass sich eine Informationsmenge bei Umformungen nicht vergrößert, zum Gesetz, dann gewinnen wir die Klarheit eines Forschers, dem es stets erlaubt ist zu fragen: "Woher? Warum? Wieviel?"

Gleichzeitig aber stürmen auf uns viele verwirrende Fragen ein. Die belebte Natur hat sich von den einfachsten Urganismen bis zu uns den Menschen, entwickelt: Wo befand sich unsere Information, als es noch keine Menschen gab? Im Verlaufe von Jahrtausenden entwickelten sich Wissenschaft, Kunst und Technik; woher sind sie gekommen?

Die unklare Vorstellung, dass Information weder in der Natur noch im Gehirn "aus dem Nichts" entsteht, sprach zum ersten Mal in phantastischer Form der griechische Philosoph Plato aus, der lehrte, dass sich die Seele nur Bilder und Ideen ins Gedächtnis ruft, die ihr schon früher bekannt waren.

Wenn wir nicht zu Verfechtern dieser mystischen Vorstellung herabsinken wollen, so müssen wir Erscheinungen untersuchen, bei denen Information aus etwas entsteht, was noch keine Information ist, sondern nur eine notwendige Voraussetzung für ihr Entstehen, ein Informationspotential.

In einem Kybernetikseminar diskutierte eine Gruppe von Ingenieuren lange die Frage, ob in dem Begriff "Gott" eine Information liegt. Es ist allgemein bekannt, dass es keine Götter gibt. Über etwas, das nicht existiert, kann man offensichtlich über keinen Kanal Nachrichten erhalten. Und dennoch geht der Streit darum. Nehmen wir eine sehr ähnliche Situation. In der Literatur gibt es viele erdachte Helden, z. B. Baba-Jaga, Buratino, Don Quichote. Die Eigenschaften dieser Gestalten sind zweifellos nicht vollständig erfunden, sondern zum Teil der Wirklichkeit entnommen. So ist auch der Inhalt des Begriffs "Gott" zwar sehr durch Rauschen verzerrt, aber dennoch teilweise dem Leben entlehnt.

Warum interessieren sich Ingenieure, die an elektronischen Maschinen arbeiten, für solche abstrakten Probleme?

Die Praxis stellt ihnen immer schwierigere Aufgaben, die sie vorläufig noch nicht an Maschinen zur Lösung weitergeben können. Bevor sie diese Aufgaben in Angriff nehmen, bevor sie Kräfte, Zeit und Mittel aufwenden, möchten die Ingenieure wissen, ob diese Aufgaben prinzipiell lösbar sind. Für ein Herangehen an dieses Problem gibt es fürs erste nur ein Grundprinzip:

Die Arbeit einer vollprogrammierten Maschine liefert keine neue Information. Eine solche Maschine kann nichts herleiten, was nicht in den Voraussetzungen steckt, was man nicht implizit in sie eingegeben hat.

Es ist schwer festzustellen, wer diese Idee zum ersten Mal geäußert hat. Möglicherweise war es Ada-Augusta Lowlas (1815-1852), die Tochter Byrons und Schülerin des englischen Mathematikers Babbage.

Natürlich enthält die in die Maschine eingespeiste Information das Endergebnis nur in impliziter, verborgener Form, denn sonst wäre es nutzlos, die Maschine arbeiten zu lassen. Gewöhnlich ist das Ergebnis in zwei Informationskomplexen enthalten, die der Maschine zugeführt werden, nämlich teilweise in den Voraussetzungen (den Ausgangsdaten) und teilweise in dem Lösungsprogramm, das man in einem allgemeineren Sinne als Algorithmus bezeichnet. Die Maschine findet das Ergebnis, indem sie beide Teile verarbeitet.

Die Theorie dieser Prozesse wurde in unserer Zeit zu einem besonderen Zweig der Mathematik, der Theorie der Berechenbarkeit oder der Algorithmen. Einen großen Beitrag zu dieser Theorie leistete der englische Mathematiker A. M. Turing.

In den Jahren 1936 und 1937 bewies Turing, dass es möglich ist, die Aufgaben, die eine streng determiniert arbeitende Maschine mit einem unbeschränkten Gedächtnisvolumen ausführen kann, klar zu umreißen und damit auch eine Übersicht über die Klasse derjenigen Aufgaben zu gewinnen, die die Kräfte einer solchen Maschine übersteigen.

Stellen wir uns eine Maschine vor, sagte Turing, die fähig ist, endlich viele verschiedene vorgeschriebene Operationen nacheinander unbegrenzt oft auszuführen. Sie ist bis zu einem gewissen Grade mit einem zuverlässigen und gewissenhaften, aber stumpfsinnigen Rechner vergleichbar, der - mit Bleistift, Papier und Radiergummi bewaffnet - anfängt, streng nach einer gegebenen Vorschrift mathematische Operationen auszuführen, ohne sich im geringsten dafür zu interessieren, welchen Sinn das hat.

So entstand die berühmte "Turing-Maschine", ein gedankliches Modell, das hilft, sich über komplizierte Vorgänge Klarheit zu verschaffen.

Die Turing-Maschine ist ein idealisierter Automat, der in einzelnen Schritten arbeitet und in jedem Schritt eine einfache Umformung der eingespeisten Information vornimmt. Die Eingabeinformation wird von einem diskreten, gewöhnlich binären Signal mit einer räumlichen Dimension in einer bis zum äußersten entwickelten, redundanten<sup>27</sup> Form geliefert - nämlich als ein beiderseits unbegrenzt langes Band, das in einzelne Felder (die Einzelsignale) eingeteilt ist, in denen je eines von endlich vielen Zeichen (Signalwerten) steht. -

---

<sup>27</sup>Eine Kodierung einer Informationsmenge heißt redundant, wenn es eine andere Kodierung dieser Informationsmenge gibt; die im Mittel mit weniger Einzelsignalen auskommt. Angenommen, die Informationsmenge besteht aus den beiden Nachrichten "ich bin an der Universität angenommen worden" und "ich bin nicht an der Universität angenommen worden". Eine optimale Kodierung besteht nun darin, dass etwa im ersten Fall ein Telegramm ohne Text (bzw. mit dem Text „A“, falls die Post auf einen Text besteht) gesandt wird und im zweiten Fall kein Telegramm. Dagegen ist eine Kodierung durch Telegramme etwa mit den Texten "bin angenommen" bzw. "bin nicht angenommen" redundant.

Die Maschine besitzt einen sogenannten Lesekopf, ein "künstliches Auge", mit dem sie stets genau ein Feld des Bandes überblicken und das auf diesem Feld befindliche Zeichen lesen kann. Sie kann dieses Zeichen löschen und ein anderes Zeichen in das frei gewordene Feld eintragen, sie kann es auch ungeändert lassen.

Schließlich kann sie das Band bewegen, und zwar in jedem Schritt um ein Feld nach rechts bzw. links, so dass der Lesekopf nach dieser Operation das dem soeben bearbeiteten Feld rechts bzw. links benachbarte Feld abliest. Welche dieser Operationen die Maschine im gegebenen Schritt ausführt, hängt vom gelesenen Zeichen und dem Programm der Maschine ab.

Außer dem Band, dem "äußeren Gedächtnis", besitzt die Maschine auch ein "inneres Gedächtnis", so dass sie unter gewissen Bedingungen ihre Zustände ändern und bei den gleichen Situationen in Abhängigkeit von der Vorgeschichte verschieden reagieren kann. Sie kann einen "Stopzustand" erreichen, d. h., sie bleibt stehen, wenn sie den Auftrag ausgeführt hat. Der Zustand des Bandes nach dem "Stop" bildet das Resultat der durchgeführten Informationsverarbeitung.

Alle Operationen der Maschine steuert der Auftrag - ein Programm in Form einer Tabelle, in der in Abhängigkeit von dem Zustand der Maschine und dem Zeichen, das sie liest, die auszuführenden Operationen angegeben sind: welches Zeichen in das bearbeitete Feld einzusetzen ist, wie danach das Band zu verschieben ist und in welchen Zustand die Maschine überzugehen hat.

Da die Maschine in einem einzelnen Schritt nur einfachste denkbare Informationsumformungen durchführen kann, benötigt sie z. B. für die einfache Addition  $4 + 3$  mehr als zehn Schritte.

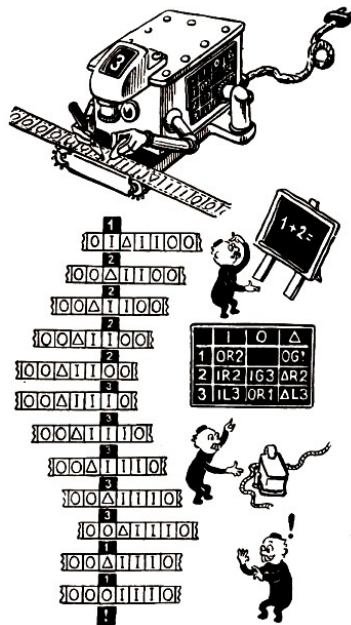


Bild 7.1.: Ist die Aufgabe  $1 + 2 = ?$  leicht?

Versuchen wir, sie der Turing-Maschine zu stellen. Dazu müssen wir der Maschine zunächst erklären, was "Addition" ist, indem wir einen Algorithmus aufstellen (s. schwarze Vor den Zeilen steht der "Zustand" der Maschine, über den Spalten das Zeichen, das sie sieht; in den Kreuzungsfeldern wird angegeben, welches Zeichen die Maschine einsetzt, zu welchem Feld sie übergeht (L - links, R - rechts, G - gleiche Stelle) und welchen "Zustand" sie annimmt (! - Stop). Diesen Algorithmus lassen wir von der Maschine ausführen. Die Lösung der Aufgabe „1+2“ erfordert 12 Arbeitsgänge.

Dennoch ist sie zur Ausführung jeder noch so komplizierten Operation bei der Umformung von Informationen fähig, die man ihr durch ein Programm aufträgt. Als Kriterium dafür, dass eine Informationsumwandlung "algorithmisch ausführbar", d. h. für jede beliebige Eingangsinformation in endlich vielen Schritten mit bestimmten endlich vielen Operationen durchführbar ist, dient dem Mathematiker, dass diese Informationsumwandlung von einer Turing-Maschine durchgeführt werden kann. Solche Informationsumwandlungen sind beispielsweise das "Berechnen" einer Funktion, z. B. des Polynoms  $f(x) = x^2 + 2x + 1$ , für alle natürlichen Zahlen als Werte des Argumentes  $x$ .

Man schreibt  $x$  in kodierter Form (z.B.  $x$  Einsen nebeneinander) auf das Band, und die Ma-

schine berechnet den zugehörigen Wert  $f(x)$ . Für  $x = 2$  würde also zum Schluss die Zahl 9 in kodierter Form auf dem Band stehen. Das Berechnen einer Funktion bedeutet, eine ganze Klasse von Aufgaben zu lösen; nämlich in unserem Beispiel (wenn wir als Definitionsbereich des Polynoms alle natürlichen Zahlen  $0, 1, 2, \dots$  nehmen) die unendliche Menge von Aufgaben

$$0^2 + 2 - 0 + 1 = ?, \quad 1^2 + 2 - 1 + 1 = ?, \quad 2^2 + 2 - 2 + 1 = ? \quad \text{usw.}$$

Wenn wir davon sprechen, dass eine Aufgabe algorithmisch lösbar sei, so meinen wir damit stets, dass eine ganze Menge gleichartiger Aufgaben (die sich nur durch bestimmte Parameterwerte wie dem  $x$ -Wert im obigen Beispiel voneinander unterscheiden) nach einem einheitlichen Verfahren, das durch den Algorithmus beschrieben wird, in je endlich vielen Schritten gelöst wird.

Dass eine Menge von Aufgaben nicht algorithmisch lösbar ist, bedeutet nun nicht, dass die einzelnen Aufgaben dieser Menge nicht lösbar sind (es ist eine Erfahrungstatsache, dass früher oder später jede Aufgabe gelöst oder ihre Unlösbarkeit nachgewiesen wird), sondern dass es keine einheitliche Methode gibt, nach der jede Aufgabe dieser Menge in jeweils endlich vielen Schritten gelöst werden kann.

Man muss also unterscheiden zwischen solchen Aufgaben, die man nicht mit Hilfe eines Algorithmus lösen kann, weil noch kein Algorithmus dazu gefunden werden ist, und solchen, die überhaupt algorithmisch unlösbar sind.

Ein Gleichungssystem der Form

$$\begin{aligned} a_{11}x + a_{12}y &= b_1 \\ a_{21}x + a_{22}y &= b_2 \\ \text{zum Beispiel} \quad 2x + 7y &= 13 \\ x + y &= 4 \end{aligned}$$

kann man nach dem Algorithmus lösen, den die elementare Mathematik für diese Klasse von Aufgaben angibt, d.h., man konstruiert in endlich vielen Schritten mit Hilfe der arithmetischen Operationen  $+$ ,  $-$ ,  $\cdot$ ,  $:$  Zahlen  $x, y$ , die beide Gleichungen erfüllen, oder stellt (ebenfalls in endlich vielen Schritten) fest, dass solche Zahlen nicht existieren. In unserem Beispiel ergibt sich genau eine Lösung:

$$x = 3, \quad y = 1$$

Anders liegen die Dinge beim folgenden, wesentlich komplizierteren, sogenannten Fermatschen Problem. Zu einer beliebigen natürlichen Zahl  $n > 2$  sind natürliche Zahlen  $x, y, z$  gesucht, für die gilt:

$$x^n + y^n = z^n$$

Bis heute ist kein Algorithmus bekannt, der dieses Problem für beliebiges  $n$  löst, d. h. entweder solche Zahlen in endlich vielen Schritten aufweist oder anzeigt, dass es für das gegebene  $n$  solche Zahlen nicht gibt.

Von zahlreichen wichtigen Problemen ist bewiesen worden, dass sie algorithmisch unlösbar sind. Dazu gehören das sogenannte Wortproblem in Halbgruppen, das Entscheidungsproblem der Mathematischen Logik u. a. allgemein ausgedrückt, ist beim Entscheidungsproblem der Mathematischen Logik nach einem Algorithmus gefragt, der es ermöglicht, von einer beliebigen mathematischen Aussage in endlich vielen Schritten festzustellen, ob diese Aussage wahr oder falsch ist.

Obwohl man weiß, dass jede (exakt-formulierte) mathematische Aussage entweder wahr oder falsch ist, gibt es also kein allgemeines Verfahren, nach dem man für eine beliebige Aussage in endlich vielen Schritten feststellen kann, ob sie wahr oder falsch ist.

In den Fällen, wo zur Lösung eines Problems kein Algorithmus bekannt ist, kann man vielfach mit dem Durchprobieren einer Menge von möglichen Lösungen zum Ziel kommen. Ist die Menge  $M$  der durchzuprobierenden Lösungen endlich, dann ist die Anweisung "Probiere die Elemente der (endlichen) Menge  $M$  daraufhin aus, ob ein Element den Anforderungen des Problems genügt", ein Algorithmus, denn nach endlich vielen Schritten ist man mit dem Durchprobieren einer endlichen Menge fertig.

So kann man beispielsweise unser oben angegebenes Gleichungssystem auf diese Weise zu lösen versuchen:

Man setzt der Reihe nach die natürlichen Zahlen

$$0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

so lange für die Unbekannten ein, bis Zahlen auftreten, die beiden Gleichungen genügen.

Man kann das Durchprobieren auch mit den Zahlen einer zufälligen Folge vornehmen.

Ist die Menge der möglichen Lösungen unendlich (in unserem Beispiel handelt es sich um die Menge aller Paare  $x, y$  von natürlichen Zahlen), dann ist es ungewiss, ob man mit dem "Probierverfahren" in endlich vielen Schritten eine Lösung finden kann. Das Gleichungssystem

$$2x + 7y = 13 \quad , \quad 4x + 14y = 13$$

besitzt offensichtlich überhaupt keine Lösung. Daher kommt man mit dem Durchprobieren niemals zu einem Ende. In endlich vielen Schritten können nur endlich viele Paare  $x, y$  ausprobiert werden, keines davon ist eine Lösung, es bleiben stets noch unendlich viele Paare  $x, y$ , die noch durchprobiert werden müssen, übrig.

Um das Durchprobieren mit Erfolg anzuwenden, muss man die Zahlen, die auf gut Glück oder systematisch durchprobiert werden, einer Einschränkung unterwerfen, die aus dem Wesen der Aufgabe folgt, oder zumindest einer solchen Einschränkung, der alle Ergebnisse genügen, die zuvor für diesen Typ von Aufgaben gefunden worden sind.

Wird etwa eine gewöhnliche Schulaufgabe über Tiefbauarbeiter gelöst, die eine Grube ausheben müssen, so werden die Ergebnisse irgendwo zwischen 1 und 10000 (bzw. 100000 oder schließlich 1000000) liegen und ganze Zahlen sein.

Praktisch ist es unter den Bedingungen unseres Planeten unmöglich, mehr als eine Million Tiefbauarbeiter an einem Ort arbeiten zu lassen, und auch die "Grube" wäre dann keine Grube mehr. Ein halber oder ein Drittel Erdarbeiter kann nur bei einer entsetzlichen Schlägerei herauskommen, und er kann weder die Hälfte noch ein Drittel der Arbeit verrichten.

Eine Maschine, die die Zahlen dieses Bereichs mit einer Geschwindigkeit von zehntausend Operationen in der Sekunde durchprobiert, löst eine solche Aufgabe sehr schnell. Im Gegensatz dazu löst eine Maschine, die die natürlichen Zahlen von 1 Million an aufwärts durchprobiert, die Aufgabe nie.

Das Durchprobieren von Zahlen, die als Lösung in Frage kommen, erinnert sehr an das Verhalten eines unaufmerksamen Schülers, der in der Mathematikstunde unter der Schulbank irgend etwas über Spione gelesen hat, den Algorithmus zur Lösung seiner Aufgabe nicht behalten hat und zu Hause anfängt, die Lösung der Aufgabe "einzukreisen".

Seine Auffassungsgabe reicht gewöhnlich so weit, dass er nicht in das Gebiet astronomischer Zahlen klettert. Er löst die Aufgabe nicht durch Durchprobieren, da seine Arbeitsgeschwindigkeit und in der Hauptsache seine Fähigkeit, stur eintönige Einsetzungen auszuführen, hinter den Fähigkeiten einer Maschine zurückstehen.

Und doch ist das Probieren ein notwendiger Bestandteil vieler mathematischer Methoden, angefangen von der gewöhnlichen Division, bei der die Ziffern des Quotienten durchprobiert und dann durch Multiplikation geprüft werden, bis zu den "Monte-Carlo-Methoden", die heute bei der maschinellen Lösung ganz verschiedenartiger Aufgaben viel verwendet werden.

Bei der approximativen Berechnung einer Größe nach einer Monte-Carlo-Methode spielt der Zufall, das Rauschen, eine gewisse Rolle. Will man z. B. die Größe einer Fläche, die von einer Kurve in einer Ebene begrenzt wird, berechnen, so schließt man diese Fläche in ein Rechteck ein (dessen Flächeninhalt leicht zu errechnen ist) und "schießt" nun so auf dieses Rechteck, dass alle seine Punkte mit der gleichen Wahrscheinlichkeit getroffen werden, d. h., man benutzt ein Gerät, das in vollkommen zufälliger Weise "Zufalls"zahlen produziert, und ordnet diesen Zahlen Punkte des Rechtecks zu - jeder "Schuss" besteht also darin, dass dieses Gerät eine Zufallszahl liefert.

Dabei zählt man nur die "Treffer", die innerhalb der zu bestimmenden Fläche liegen, und die Anzahl der "Schüsse". Nach einer hinreichend großen Anzahl von "Schüssen" ist der Quotient, dessen Zähler die Anzahl der "Treffer" und dessen Nenner die Anzahl der "Schüsse" ist, eine gute Approximation für den Quotienten, der aus dem (unbekannten) Flächeninhalt und dem Inhalt des Rechtecks gebildet ist.

Das Rauschen, das zur Ausführung von Umformungen nach einer "Monte-Carlo-Methode" erforderlich ist, ist keine Informationsquelle, da allein die Anfangsinformationen der Aufgabe die Grundlage für die Auswahl einer vom Rauschen vorgeschlagenen Lösung bilden. Bei der Verwendung einer vorgelegten Lösung wissen wir jedoch manchmal nicht, dass in der Lösung oder in den Voraussetzungen der Aufgabe eine Zufälligkeit enthalten ist, und sehen die erhaltene Information, die ihrem Wesen nach unvollständig ist, als vollständig an.

Eine Aufgabe kann beispielsweise mehrere Lösungen oder überhaupt keine besitzen.

Was bedeutet das? Die Voraussetzungen einer Aufgabe, die mehrere Lösungen hat, beschreiben nicht eine Situation, sondern mehrere verwandte, zwischen denen eine Auswahl nicht getroffen worden ist.

Eine quadratische Gleichung zum Beispiel hat im allgemeinen zwei Wurzeln und enthält daher nicht die ganze Information über die unbekannte Zahl  $x$ . Hat eine Aufgabe überhaupt keine Lösung, so sind ihre Voraussetzungen nicht gemeinsam realisierbar, diesen Voraussetzungen entspricht keine reale Situation. In unserem Beispiel

$$2x + 7y = 13 \quad , \quad 4x + 14y = 13$$

gibt es keine reale Situation, d.h. keine Werte für die Variablen  $x, y$ , die beide Voraussetzungen zugleich erfüllen: Die Voraussetzungen widersprechen einander. Mit anderen Worten: die Eingabeinformationen widersprechen einander. Auch in diesem Fall wollen wir von unvollständiger Information sprechen.

Als Maß für die Unvollständigkeit einer Information nimmt man die Differenz zwischen der Größe der Unbestimmtheit der Lösung, die vor dem Erhalt dieser Information vorlag, und der Größe der erhaltenen Information selbst. Nehmen wir das alte Beispiel.

Um einen Zug auf eines von 32 Gleisen eines Bahnhofs zu dirigieren. ist ein Befehl von 5

bit erforderlich, der auf die Weichen übertragen wird. Wir übertragen aber nur 3 bit, d.h. geben eine unvollständige Information an die Weichen, so dass die Stellung nur der ersten drei Weichen festgelegt ist.

Die übrigen Weichen pendeln in zufälliger Weise hin und her, sie ändern unregelmäßig ihre Richtung. Was soll der Lokführer tun?

Ist er bis an die erste unbestimmte Weiche herangefahren, so kann der Lokführer eine Münze werfen und, nachdem er von ihr ein zufälliges Signal erhalten hat, das scheinbar eine Information enthält, die Weiche stellen. Wenn es die Konstruktion der Weichen erlaubt, kann er auf gut Glück fahren.

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Lokführer den Zug auf das Gleis bringt, auf das er ihn bringen sollte, ist natürlich gleich einem Bruchteil von 1, der um so kleiner ist, je größer die Unvollständigkeit der Information ist.

In der Wissenschaft und besonders in der Technik streben wir stets nach Vollständigkeit der Information. Das ganze harmonische Gebäude der Mathematik ist auf dieser Vollständigkeit errichtet worden. Die Axiome, Definitionen und Schlussregeln sind so formuliert, dass Unbestimmtheiten des Ergebnisses vermieden werden.

Nur in der Wahrscheinlichkeitstheorie wird die Unbestimmtheit zugelassen, aber auch hier in sehr strengen Grenzen. Bei der Konstruktion von Mechanismen und Maschinen werden die den Körpern eigenen Freiheitsgrade<sup>28</sup> so lange eingeschränkt, bis eine determinierte Maschine entsteht, auf deren Verhalten man sich verlassen kann.

Für jeden sich bewegenden Teil ist nur ein Freiheitsgrad zulässig, aber auch dieser ist durch die Eigenschaften des Getriebes, das die Bewegung überträgt, beschränkt.

Ein Ingenieur erschrickt, wenn er an der fertigen Zeichnung feststellt, dass etwa die zukünftige Werkzeugmaschine die Freiheit hat, mit ihrem Schneidestahl zu verfahren, wie es ihr gerade einfällt, dass sie ihn in unverantwortlicher Weise nach verschiedenen Seiten schwenken kann, weil einer ihrer Freiheitsgrade aus Versehen nicht eingeschränkt ist. Er ist überzeugt, dass eine solche Konstruktion (mit einer unvollständigen Information in der Struktur) keine zweckmäßigen Ergebnisse liefern wird.

Wenn wir nur unvollständige Informationen verarbeiten, so werden wir dem Sonderling ähnlich, der, wie das mancherorts noch heute üblich ist, beschloss, auf eine Heiratsanzeige hin zu heiraten. Die Zeitung lügt nicht:

Der Suchende bekommt wirklich eine Blondine in mittleren Jahren, die selbständig ist und Musik liebt ... Aber was für Musik?! Und was bedeutet "mittlere Jahre", besonders, wenn man die normale Lebensdauer optimistisch beurteilt! Praktisch enthält die Mitteilung der Zeitung Angaben, die auf eine große Klasse von musikalischen Blondinen in mittleren Jahren zutreffen, und in dieser Klasse gibt es neben sympathischen auch wahre Hexen. Die weitere Wahl innerhalb dieser Klasse ist ganz dem Zufall überlassen.

Ein Freund, der Ihnen von einem "großen Brand" berichtet, hat womöglich eine andere Vorstellung davon als Sie, welchen Brand man groß oder sogar gewaltig nennen kann: es ist nicht ausgeschlossen, dass eine Hundehütte gebrannt hat.

Der Fortschritt der Wissenschaft und der menschlichen Erkenntnis wäre ohne die Schaffung von

---

<sup>28</sup>Die Anzahl der Freiheitsgrade eines mechanischen Systems ist die Anzahl der (zueinander senkrechten) Richtungen, in denen sich dieses System (innerhalb gewisser Grenzen) bewegen kann. Ein fliegendes Flugzeug hat also drei Freiheitsgrade, ein Auto auf einem ebenen Gelände zwei Freiheitsgrade, und das Pendel einer Uhr hat einen Freiheitsgrad.



immer allgemeineren, abstrakteren, umfassenderen Begriffen, in denen die Unvollständigkeit der Information offensichtlich zunimmt, unmöglich gewesen.

Die Abstraktion "Pflanze" enthält eine unvollständige Auswahl, da sie nicht konkret angibt, ob es sich um eine Kiefer, um Sonnentau oder eine Orchidee handelt; die Abstraktion "Kiefer" ist ihrerseits unvollständig, denn Kiefern gibt es auf der Welt viele, und es ist unbekannt, welche gemeint ist.

Einen besonderen Fall unvollständiger Information kann man wieder an dem Beispiel eines Zuges demonstrieren, der in einen Bahnhof mit 32 Gleisen einfahren soll und eine Information von 4 bit erhält, während 5 bit erforderlich wären: ? R L L R.

Mit anderen Worten, man teilt dem Zug die Stellung aller Weichen mit außer der ersten. Er kann nicht weiterfahren. Das fehlende Signal trägt nicht mehr Information als jedes andere. Es enthält eine Nachricht von 1 bit über die Auswahl einer von zwei Möglichkeiten, und wenn es nicht gegeben wird, so schließen die übrigen Signale trotzdem 30 Gleise aus und lassen nur zwei Möglichkeiten offen.

Aber der Wert der Information ist ungleich. Ohne das erste Signal ist es unmöglich, die übrigen auszunutzen, und man kann sie nur auf Vorrat legen, sich merken, als Potential speichern, um sie zu benutzen, wenn sich die Gelegenheit bietet, die Information zu vervollständigen.

In irgendeinem legendären Land gab es, wie man erzählt, zwei Städte, die Stadt der Lügner und die Stadt der ehrlichen Menschen. Die Bewohner der ersten Stadt logen, wie das aus dem Namen hervorgeht, immer und sagten nie die Wahrheit, während die Bewohner der zweiten genau das Gegenteil taten. Das Leben in diesen Städten war langweilig, und die Bewohner besuchten häufig einander.

Ein Reisender kam nachts in das Land, ging in eine der Städte und fragte den ersten, der ihm begegnete: "Bin ich in der Stadt der Lügner?" "Nein", erwiderte der Passant.

Obwohl eine Information von 1 bit gegeben werden ist, hat sie überhaupt keinen Wert: es kann weder erschlossen werden, in welcher Stadt sich der Reisende befindet noch aus welcher Stadt der Angesprochene stammt. Dann fragte der Reisende:

"Sind Sie ein Hiesiger?" "Ja!" sagte der Passant und entfernte sich.

Nun ist klar, dass sich der Reisende in der Stadt der ehrlichen Menschen befindet und mit einem Einwohner dieser Stadt gesprochen hat. Obwohl die letzte Antwort auch nur 1 bit enthält, sind zwei Auswahlen getroffen worden, d. h., die zweite Antwort hat der ersten einen Wert verliehen.

Ihr Freund, der von dem großen Brand erzählt, kann präzisierend hinzufügen, dass ein sechsstöckiges Haus brannte, dass die Menschen schluchzend auf die Straße stürzten und dass zehn Löschmannschaften ankamen. Bei aller Fülle der Nachrichten kann diese Information in den ersten Angaben unvollständig sein: "Ist das wirklich alles wahr?"

Es gibt viele Informationen, bei denen sich ein kleiner Irrtum in den ersten Angaben als verhängnisvoll erweist. Sie sind einfach falsch, sind aus Elementen von Ereignissen zusammengesetzt, die sich zu einer anderen Zeit und an einem anderen Ort zugetragen haben.

Dem Begriff "Gott" schreibt man gewöhnlich einen Sinn zu, der Merkmale der verschiedensten Naturerscheinungen und in der Hauptsache des Menschen selbst enthält.

In diesen Merkmalen liegt eine gewisse Information, die beim Erkennen der Natur erhalten wurde und deshalb verständlich ist.

Da aber dieser Begriff als Ganzes nichts Realem entspricht, bilden die für ihn ausgewählten Merkmale ein Durcheinander. Die Auswahl ist willkürlich und widersprüchlich, folglich ist die in diesem Begriff enthaltene Information unvollständig.

Eine unvollständige Information liefert die Uhr. Ein Seechronometer mit einer 24-Stunden-Skale und einer Genauigkeit von 5 Sekunden liefert etwa 14 bit Information, wenn die Zeit völlig unbestimmt ist, d. h., wenn der Seemann zum Beispiel in der Kajüte aufgewacht ist, ohne die geringste Vorstellung davon zu haben, ob es Morgen oder Abend ist.

Von einer gewöhnlichen Armbanduhr sagt man noch nicht, dass sie ungenau geht, wenn sie von der genauen Zeit pro Tag um anderthalb Minuten abweicht. Dabei liefert die Armbanduhr ungefähr 9 bit Information. Sie ist ihrem Wesen nach unvollständig, da sie einem Menschen, der "die Uhr nicht kontrolliert", nichts Wertvolles mitteilt.

Aber eine andere Information, beispielsweise über die Begegnung von Freunden "um acht Uhr an der Kolonnade des Bolschoi-Theaters", ist ohne die Angaben einer Uhr ebenfalls unvollständig. Beide ergänzen einander, und ihrer Bestimmung gemäß müssen sie zusammen wenig wahrscheinliche Ereignisse hervorrufen, und das tritt im täglichen Leben auch ein.

Beobachtet man nämlich Moskau aus einem Hubschrauber, seine Straßen, Plätze, Höfe, Wohn- und Arbeitsräume, so kann man annehmen, dass sich die Millionen von Menschen vollkommen chaotisch, nach der Hypothese der "molekularen Regellosigkeit" bewegen.

Kennt man die Geschwindigkeit und die täglich zurückgelegte Strecke des Durchschnittsmoskauer, so kann man die Wahrscheinlichkeit für den Zusammenstoß zweier beliebiger Einwohner der Stadt berechnen. Aber die höflichen Moskauer stoßen am Ende ihrer freien Wegstrecke nicht zusammen, sondern machen einander den Weg frei. Dafür haben sie Augen, die eine Information über die Vorübergehenden übermitteln.

Eine indiskrete Beobachtung zeigt auch, dass dort dieser junge Moskauer mit dem kurzen Mantel und jene blonde Moskauerin mit dem Nylonpelz sich jeden Abend um acht Uhr an der Kolonnade des Bolschoi-Theaters treffen und damit leichtsinnig die Theorie untergraben, nach der sie sich nicht öfter als einmal alle fünf Jahre treffen dürfen. Wie ist das möglich?

Natürlich dadurch, dass sie sich zuvor persönlich oder telefonisch verabredet und dann auf die Uhr gesehen haben, d. h. dadurch, dass sie relativ wertvolle Informationen erhalten und kombiniert haben.

Die These, dass jede Information über die physikalische Welt ihrem Wesen nach unvollständig ist, wie genau man sie auch ausdrücken mag, pflegt man in der Mathematik nach Williard Gibbs (1839-1903) in der folgenden eleganten Form auszusprechen.

Beschreibt man ein physikalisches System, so beschreibt man immer eine gewisse Menge von Systemen, auf die die Beschreibung gleichermaßen zutrifft.

"Gibbs begann, nicht eine Welt zu betrachten", so erläutert Norbert Wiener, "sondern alle Welten, in denen man Antworten auf einen beschränkten Kreis von Fragen über unsere Umwelt finden kann. Im Mittelpunkt seiner Aufmerksamkeit stand die Frage danach, bis zu welchem Grade die Antworten in Bezug auf eine Reihe von Welten auch in Bezug auf eine andere, umfassendere Reihe von Welten wahrscheinlich sind.

Außerdem entwickelte Gibbs die Theorie, dass diese Wahrscheinlichkeit mit wachsendem Alter des Weltalls naturgemäß einer Vergrößerung zustrebt."<sup>29</sup>

---

<sup>29</sup>N. Wiener: 'The human Use of Human Beings - Cybernetics and Society. New York, 1954. Zitiert nach der russ. Übersetzung.

Man kann der umstrittenen Art und Weise, mit "Welten" und dem "alternden Weltall" zu manipulieren, aus dem Wege gehen und sagen, dass die Systeme in natürlicher Weise ihre qualitative Unterschiedlichkeit, die Ungleichheit in der Verteilung der Elemente verlieren und einander ähnlich werden: man kommt so zu dem bekannten Prinzip vom Wachsen der Entropie.

Das klassische Objekt der physikalischen Statistik sind nicht die Einwohner einer Großstadt, nicht die Ameisen eines aufgerissenen Ameisenhaufens, sondern die Moleküle eines Gases, die man wegen der Einfachheit ihrer Form, der Größe ihrer freien Weglänge und des Fehlens von Rückkopplungen und eines Gedächtnisses als Punkte ansehen kann, die sich völlig regellos bewegen.

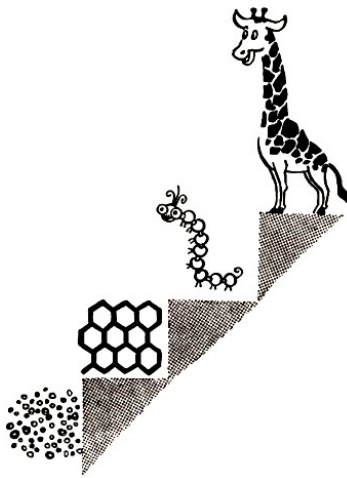


Bild 7.2.: Systeme, die die Stufen der Vervollkommnung emporsteigen (oder, kybernetisch gesprochen, die Information sammeln), verlieren die geometrische Isotropie, dafür gewinnt ihr Aufbau an Zweckmäßigkeit.

Ein gutes Modell zur Veranschaulichung dieser Hypothese bilden Staubkörnchen, die irgendwo auf dem Dachboden - in einem Lichtstrahl tanzen. In einer Lösung oder Schmelze, in der sich die Moleküle nähern, insbesondere in einer solchen, in der sehr große Moleküle auftreten - Polymere, die eine individuelle komplizierte Form haben -, büßt die physikalische Statistik ihre Gültigkeit jedoch allmählich ein, und es entstehen Systeme mit einer entgegengesetzten, "inversen", kybernetischen Statistik, die man als molekulare Automaten und je nach der gespeicherten Information auch als Lebewesen bezeichnen kann.

Die einfachste Erscheinung der Kybernetik auf molekularer Ebene ist die Kristallisation eines Stoffes. Die Kristalle stellen eine regelmäßige räumliche Anordnung der Moleküle des Stoffes dar, einen gewissen, wenn auch nicht hohen Grad von Organisation in der Menge der Moleküle.

Wie der russische Kristallograph J. Federow bewiesen hat, gibt es 230 Formen räumlicher Gitter für die Verteilung der Moleküle bei der Kristallisation, und ein kristallisierendes System wählt immer das Gitter, in dem die Moleküle am dichtesten gepackt werden. Diese Information entsteht beim zufälligen Durchprobieren aller möglichen Lagen der Moleküle - bei der Wärmebewegung in der Lösung oder Schmelze.

Damit die Kristallisation beginnt, braucht in dem Medium nur ein Kristall aufzutauchen. Bringt man es von außen hinein oder entsteht es zufällig, so beginnt die Masse der Moleküle sofort lawinenartig sich zu ordnen. Neue Information entsteht nicht: Sie ist vollständig in der Kombination enthalten, die als "Kristallisationskern" gedient hat.

Ist die notwendige Informationsmenge klein, so entstehen viele solche Kerne, und es bildet sich ein halbkristalliner Stoff; ist jedoch die Form des Kristalls kompliziert, so kann die regelmäßige Packung erst nach einer riesigen Anzahl von Versuchen gefunden werden.

Wie gering manchmal die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der erforderlichen Kombination ist, zeigt die Geschichte des kristallinen Glycerins. Glycerin wurde 1783 zum erstenmal gewonnen, aber mehr als 80 Jahre gelang es nicht, es in kristallisierter Form zu erhalten: bei Abkühlung erstarrte es, aber kristallisierte nicht.

Im Jahre 1867 beobachtete man in irgendeinem Laboratorium Glycerin, das sich kristallisiert

hatte. Man teilte es in Stückchen auf, und heute erhält man in den chemischen Werken mit Sicherheit kristallisiertes Glycerin, indem man in eine unter- kühlte Lösung einen winzigen Glycerinkristall hineinbringt - einen "Nachkommen" der Kristalle von 1867.

Im Kristallisationsprozess unterliegt die Information wie bei jeder anderen Übertragung und Umformung gewissen Störungen. Praktisch hat jeder Kristall Fehler. Atome eines Zusatzes, der sich in dem Stoff befindet, können auf die Struktur von Teilen des Kristalls einwirken, sie verzerren und können zu sogenannten Dislokationskernen werden.

Eine eigenartige Übergangsform zwischen Lösungen und wirklichen Kristallen stellen die "flüssigen Kristalle" dar, die von verhältnismäßig großen, langgestreckten Molekülen gebildet werden. Elektrostatische Anziehungs- und Abstoßungskräfte, die von der Verteilung der Elektronen über die Oberfläche der Moleküle abhängen, zwingen sie, sich in der Lösung regelmäßig in gewissen Abständen voneinander anzuordnen. Ein Beispiel eines flüssigen Kristalls ist eine Seifenlösung.

Nicht nur die physikalischen, sondern auch die chemischen Eigenschaften der Stoffe - ihre Fähigkeit, sich zu verbinden, zu zerfallen und neue Verbindungen einzugehen - hängen von den statistischen Eigenschaften des Molekülensembles ab. Legen wir die Hypothese der molekularen Regellosigkeit zugrunde, so können wir ausrechnen, wie groß bei der gegebenen Konzentration und Temperatur der Lösung die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens zweier Moleküle ist, die fähig sind, aufeinander zu reagieren, und daher können wir den Ablauf der Reaktion berechnen.

Dabei nehmen wir an, dass nicht nur die Bahnen der Moleküle, sondern auch ihre Lagen bei einem Zusammentreffen völlig zufällig sind und keiner Steuerung unterliegen.

Das Zusammentreffen zweier Moleküle kann nur dann zu einer Reaktion führen, wenn sie sich in entsprechenden Lagen zueinander befinden. In  $100 \text{ cm}^3$  einer Lösung von Äthylbromid und Diäthylsulfid finden nach Berechnungen von D. Pfeiffer  $1,6 \cdot 10^{34}$  Zusammenstöße von Molekülen in der Sekunde statt, und bei mehreren Milliarden Zusammenstößen tritt eine Reaktion ein (die Wahrscheinlichkeit ist  $1 : 10^{15}$ ).

Diese Wahrscheinlichkeit kann man jedoch ändern, indem man in die Lösung Stoffe bringt, die selbst an der Reaktion nicht teilnehmen, aber fähig sind, die Lage der Moleküle im Moment der Reaktion zu regulieren. Solche Stoffe nennt man Katalysatoren.



Bild 7.3.: Die Chemiker stellten fest, dass ein Katalysator in der Form seiner Moleküle zur Grundlage passen muss wie der Schlüssel zum Schloss.

Das Einbringen eines Katalysators ist ein Signal, ein Befehl, der einem instabilen auslösba- ren chemischen System gegeben wird und seinen Übergang aus einem wenig wahrscheinlichen unausgeglichenen Zustand in einen Gleichgewichtszustand beschleunigt. Bei einem Gleichge- wichtszustand eines chemischen Systems ist die Anzahl der Moleküle einer Verbindung, die sich neu bilden, gleich der Anzahl der durch Zusammenstöße zerfallenden.

Viele Katalysatoren besitzen eine Auswahlwirkung: von allen Reaktionen, die in einer Lösung ablaufen, können sie nur eine beschleunigen. Wie Versuche gezeigt haben, entspricht die Ober- fläche der Moleküle des Katalysators in Bezug auf die Verteilung der Ladungen in negativer

Weise der Oberfläche der Moleküle der "Grundlage", d. h. der Moleküle, auf die der Katalysator wirkt.

Es existiert noch keine hinreichend exakte Theorie der Katalyse, die es erlauben würde, zu einer vorgelegten Reaktion einen Katalysator anzugeben oder zu konstruieren. Die Chemieingenieure sind daher gezwungen, verschiedenartige Stoffe durchzuprobieren und durch Versuche zu klären, welche von ihnen die gewünschte Reaktion katalysieren.

Kybernetische Systeme, die ein bestimmtes Organisationsniveau besitzen und sich automatisch steuern, können dagegen, wie bereits gesagt wurde, selbst Signale auswählen, deren Wirkung irgendeinem Kriterium entspricht.

Ein chemisches System, das mit Hilfe von selbst erzeugten chemischen Signalen, d. h. Katalysatoren, seine statistischen Eigenschaften allmählich in Richtung einer Verringerung der Entropie und einer Erhöhung der Organisation ändert, ist daher theoretisch durchaus möglich. Und eben das ist das Leben.

Die Gesetze der Physik und der Kybernetik unterwerfen ein solches System bestimmten Einschränkungen. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann in ihm keine Energie entstehen oder vernichtet werden.

Nach dem zweiten Hauptsatz muss es energetisch offen sein: Jede Erniedrigung der Entropie im Innern des Systems muss durch eine Erhöhung der Entropie, durch eine "Zerstreuung der Energie" im Äußeren kompensiert werden.

Daher wird ein lebendes System im allgemeinen etwas wärmer sein als das umgebende Medium. Außerdem müssen in einem chemischen Automaten signalartige, steuernde Wirkungen durch Rückkopplungssysteme zustande kommen, und das Wachsen der Information in ihm muss auf Kosten der äußeren Informationspotentiale vor sich gehen.

Wie der Fluss, wie das Feuer, so bildet das sich selbst steuernde chemische System nur im dynamischen Zustand Verstärker und Rückkopplungen aus, nur bei einer ständigen Bewegung. "Das Leben", sagt Friedrich Engels, "besteht vor allem darin, dass ein Lebewesen in jedem Augenblick es selbst und doch ein anderes ist."

Auf unserem Planeten entstand das Leben vor Milliarden Jahren, als die Bedingungen auf der Erde wesentlich andere waren als heute. Die Atmosphäre war anders:

In ihr gab es weder Sauerstoff noch Kohlendioxid, sie bestand hauptsächlich aus Wasserstoff, Methan und Ammoniak. Sie ließ die starke ultraviolette Strahlung der Sonne ohne weiteres zur Erde durch, und nur die Wolken, die zeitweilig heftige warme Reger ausströmten, schützten Teile der kahlen, steinigen Erdoberfläche vor dem Zustrom der Strahlungsenergie.

Inmitten der Wolken tobten Gewitter. In ausgedehnten, aber flachen Wasserreservoirien, die zeitweilig mit dem Ozean in Verbindung standen, reagierte das Wasser zwischen den Felstrümmern mit Karbiden (Verbindungen von Kohlenstoff und Metallen) und Nitriden (Stickstoffverbindungen).

Es entstanden und zerfielen verschiedenartige Verbindungen von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Phosphor, und zwar Monomere. Einige von ihnen vereinigten sich beim allmählichen Austrocknen der Wasserlachen zu gigantischen Molekülketten, es entstanden Polymere vom Typ der modernen Kunstharze, die dann nach und nach wieder in einfachere Verbindungen zerfielen.

Im Wasser sammelten sich aus den Berggesteinen herausgewaschene Salze. Die Moleküle von Salzen, die im Wasser gelöst sind, werden bekanntlich in Teilchen aufgespalten, in Ionen,

die eine elektrische Ladung besitzen, und das Wasser wird zu einem Elektrolyten, zu einem elektrischen Leiter.

Man sagt, dass wir noch heute Wasser dieser Meere in uns tragen, genauer gesagt, seine Salzzusammensetzung mit einer Konzentration von knapp 1 Prozent. Die Weltmeere sind inzwischen viel salziger geworden, aber die lebenden Organismen halten die Zusammensetzung des inneren Elektrolyten, der sie ihre Reaktionen schon lange angepasst haben, konstant.

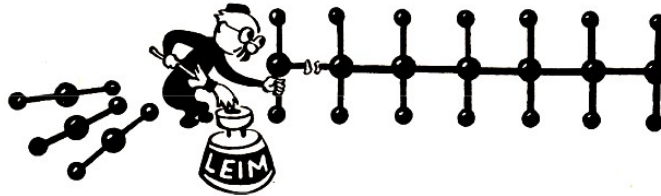


Bild 7.4.: Ein Polymeres besitzt eine verhältnismäßig einfache, einförmige Organisation. Es kann sich aber durch Ersetzen von einzelnen Teilen, von Monomeren, vervollkommen.

Auf der Oberfläche der Moleküle von Polymeren sind, wie bereits gesagt, elektrische Ladungen in außerordentlich unregelmäßiger und verschiedenartiger Weise verteilt. In einem Elektrolyten kommt es zu einer Bewegung der Ionen, zu einem elektrischen Strom zwischen diesen Ladungen.

Die Moleküle selbst bewegen sich unter dem Einfluss elektrostatischer Kräfte und ordnen sich in einer gewissen (manchmal eindeutig bestimmten) Weise an, sie bilden einen flüssigen Kristall, eine stabile Struktur inmitten der regellosen, chaotischen Bewegung der kleinen Moleküle, der Monomere. So entstanden winzige Tröpfchen, die Koazervate, die fähig waren, sich von der Lösung abzusondern.



Bild 7.5.: In der Mitte der Eiweißkatalysator, links zufällige Zusammenstöße von Molekülen, rechts geordnete. Wenn ein chemisches System nach einem Programm Katalysatoren der verschiedensten und raffiniertesten Form herstellen könnte, so könnte es die Reaktionen beschleunigen, die für seine Existenz nützlich sind. Nichts hindert uns daran, ein solches System als "lebend" zu bezeichnen.

Die molekularen Bildungen, die in den Urmeeren entstanden waren, hingen in starkem Maße von den energetischen Bedingungen ihrer Umwelt ab, d. h. von der ultravioletten Strahlung und der Wärmestrahlung der Sonne sowie von den elektrischen Entladungen in der Atmosphäre. Sie entstanden und verschwanden, ohne eine Spur zu hinterlassen, obwohl einige von ihnen durch Zufall eine relativ hohe Organisation erreichten.

Im Jahre 1898 führte der deutsche Biologe L. Rumbler eine Reihe interessanter Versuche durch, die bewiesen, dass man bei einer künstlichen Zusammenstellung einer wenig wahrscheinlichen Kombination von Bedingungen aus "toten" Stoffen ein System erhalten kann, das vorübergehend viele Eigenschaften einzelliger Tiere hat.

Rumbler erzeugte künstliche Amöben in Form von Öl- und Chloroformtröpfchen, die in Wasser schwammen. Berührte ein Chloroformtröpfchen einen dünnen Schellackfaden, so zog es ihn

nach und nach in sich hinein, als ob es ihn fressen würde.

War der Faden aus Glas und mit Schellack überstrichen, so bildete Rumlbers künstliche Amöbe einen Fortsatz aus, packte den Faden damit, löste den Schellackanstrich und warf schließlich den nackten Glasfaden wieder heraus. Tropfen einer Mischung von Öl, Chloroform und Schellack bauten sich in einer Alkohollösung eine Schale aus Glasstückchen, wie das einige Amöben tun: dabei warfen sie ungeeignet große Glasstücke beiseite.

Einmal beobachtete Rumbler, wie sich von einer künstlichen Amöbe eine Knospe ablöste und begann, sich schnell zu bewegen, indem sie Fortsätze ausbildete und einzog.

Es gelang ihm nicht, die Erscheinung zu wiederholen, und darin besteht im Grunde genommen der ganze Wert seiner Versuche. Es ist möglich, ein nicht lebendes physikalisch-chemisches System vorsätzlich oder unabsichtlich in einen solchen sehr wenig wahrscheinlichen Zustand zu versetzen, in dem es das gleiche tut wie eine lebende Zelle.

Da sich aber dieses System nicht im dynamischen Gleichgewicht befindet, da es keine Rückkopplungen hat und nicht wie ein periodischer Automat arbeiten kann, erlischt sein "künstliches Leben" bald, und das System geht in den Zustand mit der größten Entropie über.

Außerdem wird der künstlichen Amöbe von dem Experimentator eine bestimmte Verhaltensweise aufgedrängt, ohne dass deren Zweckmäßigkeit oder Unzweckmäßigkeit für die Amöbe berücksichtigt wird.

Da die künstliche Amöbe aus anderen Stoffen besteht als die lebende, führen ihre Handlungen nicht zur Aufrechterhaltung der eigenen Stabilität oder zur Inbesitznahme aktiver Energie, sondern bilden Nachahmungen von Handlungen, die unter anderen Bedingungen für Systeme aus anderen Stoffen zweckmäßig sind.

Nur ein chemischer Stoff, das kopolymere Nukleoproteid, wurde zum Träger des Lebens. Es blieb auch bei einer Änderung des Energieniveaus in der Umwelt stabil, es hielt sein Organisationsniveau auf Kosten einer Entropieerhöhung im umgebenden Medium aufrecht und erhöhte dieses Niveau sogar, es sammelte Information.

Wie geschah das? -

Das Nukleoproteid besteht aus zwei Polymeren, der Nukleinsäure und dem Eiweiß (Protein). Sein aktiver, handelnder Teil ist das Eiweiß, der steuernde die Nukleinsäure.

Nukleinsäure entsteht durch Polymerisation aus monomeren Nukleotidbausteinen, von denen jeder aus drei Teilen besteht: aus einem Zucker (einer Pentose), einem Phosphat und einer Base.

Es sind fünf verschiedene Basen und zwei Zuckerformen bekannt, die in einem Nukleotid auftreten können. Folglich sind in Bezug auf die chemische Zusammensetzung zehn verschiedene Nukleotide möglich.

Das Protein entsteht ebenfalls durch Polymerisation, seine Bausteine sind die Reste von zwanzig verschiedenen Aminosäuren.

Die Monomere können sich chaotisch, wie es gerade kommt, ohne eine bestimmte Reihenfolge, ohne zweckmäßige Organisation zu gigantischen Eiweiß- bzw. Nukleinsäuremolekülen verbinden. Übrigens kann ein Polymeres nicht Nukleotide mit verschiedenen Zuckern enthalten; daher gibt es zwei Nukleinsäuren: die Ribonukleinsäure (RNS) mit dem Zucker Ribose und die Desoxyribonukleinsäure (DNS) mit dem Zucker Desoxyribose.

Aminosäuren und Nukleotide können sich ebenfalls nicht miteinander zu Ketten verbinden.

Im Nukleoproteid besteht zwischen den Reihenfolgen der Monomere in den beiden polymeren

Bestandteilen eine feste Abhängigkeit:

In Gegenwart einer DNS mit einer bestimmten Reihenfolge der Nucleotide ist bei der Polymerisation eine nur einzige Verteilung der Aminosäuren im Protein, im Eiweiß, möglich.

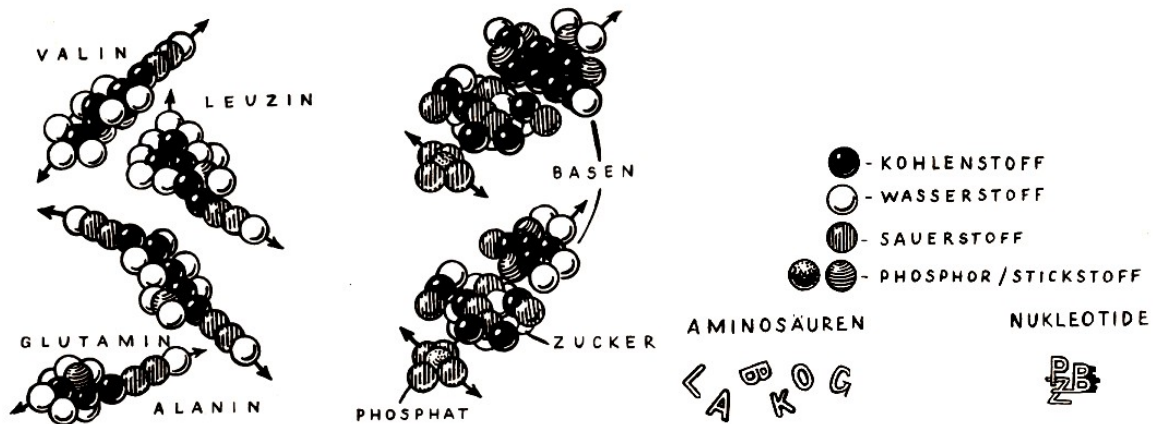


Bild 7.6.: Aminosäuren und Nucleotide, das sind die Verbindungen von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und einigen anderen Elementen, die das Ausgangsmaterial für die Entstehung von Lebewesen bildeten.

In den folgenden schematischen Darstellungen werden wir einfachere Buchstabensymbole für diese Stoffe verwenden. Die Symbole der Aminosäuren, sind einfach Buchstaben, die sich zu "Worten" für die Eiweiße verbinden können, das Symbol für die Nucleotide besteht aus den drei Buchstaben *P* (Phosphat), *Z* (Zucker) und *B* (Base).

Die Ribonucleinsäure dient in diesem Prozess als Vermittler und stellt eine Art Katalysator dar. Die Oberfläche der komplizierten und für die Mikrowelt ungeheuer großen Eiweiß- und Nucleinsäuremoleküle ist individuell sehr verschieden, daher bewirkt ihre katalytische Fähigkeit eine scharfe Auswahl: aus der Menge der Kombinationen, die in der Lösung mit gleicher Wahrscheinlichkeit durch Polymerisation entstehen, wählen sie die Variante aus, die Moleküle einer bestimmten Form liefert, und beschleunigen diese.

Will man den Prozess der Katalyse erklären, so wird man an eine Stanze erinnert: die DNS stanzt die RNS aus und die RNS das Eiweiß. Unter den Maschinen gibt es aber noch ähnlichere Einrichtungen, nämlich die Schüttelsiebe.

Man stelle sich einen großen Kasten vor, in den regellos Vorräte von irgendwelchen nicht abgedrehten Bolzen hineingeschüttet werden. Der Kasten wird ständig gerüttelt, und die Bolzen gelangen durch einen Trichter zu einer Öffnung, zu einem unten angebauten Kaliber.

Der Trichter ordnet die Lage der Bolzen allmählich, und durch das Kaliber gehen sie streng orientiert, während die, die nicht hindurchpassen, herausgeworfen werden. So arbeiten offenbar die Ionenströme, die zwischen den Makromolekülen fließen. Sie nehmen die Monomere mit, führen sie durch Kaliber, d. h. durch Atomkombinationen, wählen sie aus und ordnen sie in einer strengen Reihenfolge an, die von der Form des Makromolekülkatalysators abhängt, und diese Anordnung beschleunigt den Ablauf von einer der chemischen Reaktionen.

Bei einer gelungenen Kombination der Aminosäuren, mit der eigentlich das Leben begann, entstand mit dem Urnucleoprotein ein Eiweiß, das den Zerfall der umgebenden Stoffe beschleunigen und die in ihnen gebundene Energie für die Fortsetzung der Synthese des Nucleoproteids frei machen konnte. Diese Kombination hing von dem Bau der DNS ab, folglich war das Geheimnis ihres Erfolges in der Reihenfolge von deren Basen verborgen.

Bei einer Verminderung der verfügbaren Energiemengen erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit,



dass dieses zufällig entstandene Nukleoprotein erhalten blieb, wesentlich, da diese Verminderung andere Stoffe schneller dazu brachte zu zerfallen und es die dabei frei werdende Energie ausnutzen konnte.

Und dennoch wäre es letzten Endes zerfallen, wenn es nicht eine bemerkenswerte Besonderheit der DNS gäbe, die aus den Eigenschaften ihrer Monomere folgt.

Es handelt sich darum, dass bei der Vereinigung der Nukleotide zu einer Kette, in der Zucker mit Phosphat abwechselt, die Basen frei bleiben und aus der Kette wie Zähne herausragen. Es sind insgesamt vier: Adenin, Thymin, Guanin und Zytosin.

Zwei von ihnen (Adenin und Guanin) sind größer, die beiden anderen (Thymin und Zytosin) sind kleiner. Die Zähne sind also ungleich.

Adenin und Thymin enthalten je ein Wasserstoffatom. Geben sie dieses ab, so können sie andere Basen binden. Guanin und Zytosin besitzen je zwei Wasserstoffatome. Daher kann sich z. B. Adenin entweder wieder mit Adenin oder mit Thymin verbinden. Die Bindungen Adenin-Adenin und Thymin-Thymin sind jedoch instabil.

Bindet aber Adenin ein Nukleotid mit Thymin und Thymin eins mit Adenin, so entsteht eine stabile zweite Kette, in der die Reihenfolge von der Anordnung der Nukleotide in der ersten abhängt.

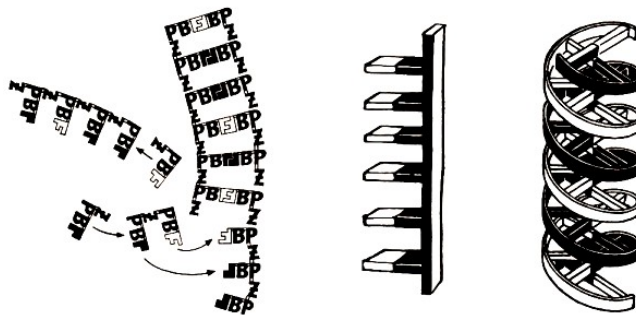


Bild 7.7.: Bei der ungesteuerten Polymerisation vereinigen sich die Nukleotide zunächst zu kleinen Ketten mit regelloser Basenreihenfolge, dann zu langen Ketten - den Matrizen - und schließlich zu gewundenen Doppelketten, wie sie links das geometrische Modell des Aufbaus der DNS zeigt.

Beide Zucker-Phosphat-Ketten drehen sich in der Lösung zu einer doppelten Spirale zusammen, und die Paare der Basen sind im Innern dieser Spirale wie die Stufen einer Wendeltreppe angeordnet.

Wenn zwei Ketten der DNS längs der Wasserstoffbindungen zerreißen, so ergänzen freie Nukleotide beide Hälften so, dass wieder zwei doppelte Ketten mit der gleichen Reihenfolge der Basen entstehen. Mit andern Worten: Die DNS kann sich vermehren, ohne ihre Individualität zu verlieren, vorausgesetzt, dass ihr genügend Energie und Material, d. h. Monomere, zur Verfügung stehen. Wir nehmen an, dass zwei Nukleoproteide vorhanden sind, die Katalysatoren für die Zerlegung komplizierter Stoffe ihrer Umgebung herstellen.

Da sie eine verschiedene Individualität haben, die von der Reihenfolge der Basen der DNS abhängt, sind die Aktivität und der Aufbau der Katalysatoren ebenfalls verschieden. Der aktivere Katalysator liefert seinem Nukleoprotein mehr Energie für die Synthese und erreicht damit, dass die Menge dieses Nukleoproteids schneller wächst als die Menge des anderen.

Unter Umständen zerlegt dieser Katalysator sogar das andere Nukleoprotein in Teile. Die Bruchstücke - Nukleotide und Aminosäuren - werden nach einer Umstellung zu Kopien des ersten, erfolgreicherer molekularer Automaten aufgebaut.

Die Enthüllung der Chemie des Lebens, der Wege der Vererbung molekularer Strukturen, ist eine der bedeutendsten Leistungen der modernen Biologie. Einen ersten Hinweis zur Enttarnung dieses Geheimnisses erhielt man 1944; als der Mikrobiologe Avery feststellte, dass Mikroben, die DNS von einer anderen Mikrobenart erhalten, allmählich Eigenschaften dieser Art erwerben und vererben.

Im Jahre 1952 wurde eine Infektion eines Bakteriums durch Parasiten, durch Bakteriophagen, beobachtet, bei der das Eiweiß der Bakteriophagen außerhalb des Bakterienkörpers bleibt und nur die DNS eindringt, aber im Bakterium dann Bakteriophagennachkommen entstehen.

Vier Jahre später konnte dieser Vorgang experimentell wiederholt werden. Forscher sonderten selbst die Nukleinsäure eines Virus ab und erhielten neue Viren, als sie diese in lebendes Gewebe einführten. Kurz zuvor stellten G. Frenkel-Konrat und Stanley gemischte Viren aus Eiweißen und Nukleinsäuren her, die zu verschiedenen Virusformen gehörten:

Die kombinierten Viren hatten die Merkmale der Art, von denen die DNS stammte.

Andere Forscher fanden wichtige quantitative Gesetzmäßigkeiten: Es wurde festgestellt, dass die DNS-Menge in den Körperzellen aller Arten von Lebewesen gleich groß ist, nur in den Geschlechtszellen ist sie genau halb so groß. Die Adeninmenge ist genau gleich der Thyminmenge und die Guaninmenge gleich der Zytosinmenge, das Verhältnis der Mengen von Thymin und Guanin ist dagegen verschieden und für die jeweilige Art charakteristisch.

1953 schließlich wurde die komplizierte Molekulartechnik der DNS von dem englischen Physiker F. Crick und dem amerikanischen Biologen J. Watson durch die Untersuchung von Röntgenaufnahmen der Moleküle völlig enträtselt.

Was bedeutet diese Technik für das Nukleotid?

Eine zufällige Erhöhung des Organisationsniveaus geht nun nicht mehr durch desorganisierende zufällige Einwirkungen verloren. Sie findet vielmehr allgemeine Verbreitung und wird zur Grundlage neuer Versuche und Irrtümer, die das lebende molekulare System automatisch ausführt.

Solange die Nukleinsäure nur ihren Aufbau kopiert, unterscheidet sich dieser Prozess im Prinzip nicht von der gewöhnlichen Kristallisation: Eine Struktur wird mehrfach wiederholt wie ein Muster auf Tapeten oder Stoffen, die Informationsmenge ändert sich nicht.

Stört ein Rauschen diesen Aufbau, d. h., tritt ein Fehler, eine Dislokation oder, wie man in der Biologie sagt, eine Mutation auf, so verringert sich die Informationsmenge sogar: Es entsteht eine Unsicherheit, die Information wird unvollständig.

Doch der Fehler hat von sich aus keine eindeutige Beziehung zum Kriterium der Stabilität: Er kann nützlich oder schädlich sein, und die Wahrscheinlichkeit, dass er schädlich ist, wächst mit der Kompliziertheit der Struktur. In den Prozess, der in dem geschlossenen Steuersystem, dem Molekülkomplex, vor sich geht, greift dann die Rückkopplung ein, die durch das umgebende Medium führt:

Die Dislokation kann verschwinden oder sich auf die ganze Struktur ausdehnen. Ist die Dislokation schädlich, so verschwindet sie. Das Verschwinden von Fehlern widerspricht bereits dem Prinzip vom Wachsen der Entropie, und die physikalische Statistik verliert hier ihre Gültigkeit. Aber die Rückkopplung sichert vorläufig nur die Erhaltung der Information.

Ist die Abweichung jedoch nützlich, so ist sie kein Fehler, sondern eine neue Information, und indem sich der "Fehler" fortpflanzt, bestimmt er als eine zweckmäßige Errungenschaft die Gestalt und die Handlungen der ganzen Masse des Nukleoproteids und damit aller in diesem.

enthaltenen DNS-Moleküle.

Das System ist also geöffnet und speichert die Information, die in dem äußeren Potential, in der Umwelt, verborgen ist.

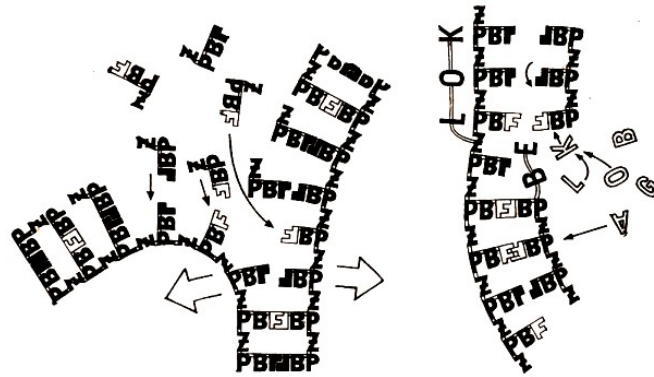


Bild 7.8.: Die Doppelkette eines Polynukleotids kann sich längs spalten, und dann regeneriert sich jede Hälfte auf Kosten freier Nukleotide, so dass zwei Doppelketten mit der gleichen Basenreihenfolge entstehen. Man nimmt an, dass diese Erscheinung die Ursache für das Auftreten lebender Systeme ist, die dem System, das sie erzeugte, völlig gleichen.

Bild 7.9.: Das Makromolekül der Nukleinsäure ist ständig dabei, schwächere Nukleotidketten, die einige Aminosäurekombinationen mit sich herumtragen, teils anzuziehen, teils abzustößen. Die Aminosäurekombinationen bleiben an der Matrize und bilden lange Polypeptidketten, die Eiweiße.

Um die Frage, ob die erblichen Änderungen in der DNS zufällig oder gesetzmäßig sind, wird bis heute erbittert gestritten. Dabei ist häufig von verschiedenen Dingen die Rede: einmal über ein Molekül, zum anderen über ein ganzes Molekülensemble.

Die Änderungen in einem Molekül entstehen zufällig, nicht gelenkt. Ihre Ursache kann ein kosmisches Teilchen sein, das die Struktur des Moleküls angreift, die radioaktive Strahlung der Erde, die Wärmebewegung der Teilchen, die das Molekül bilden, oder irgendein chemischer Stoff, der die schützenden Hüllen durchbrochen hat.

Das Verschwinden oder Ausbreiten dieser Veränderungen geschieht aber nicht zufällig, sondern in gesetzmäßiger, den Umweltbedingungen angepasster Weise.

So vollzieht sich die Auslese der gehaltvollen Varianten aus dem Rauschen im "Kampf aller gegen alle" auf der Grundlage des Kriteriums "Überleben der Art", des großen Gesetzes der organischen Welt, das von Charles Darwin (1809-1882) entdeckt wurde. Jede neue Mutation, die auf der Grundlage der alten Information entsteht, ergänzt diese durch die Erfahrung der eigenen Existenz und übergibt sie wie ein Staffelläufer den Nachkommen.

Der berühmte englische Naturforscher beschäftigte sich nur mit einem Problem: Wie entstanden die verschiedenen Arten der Tiere und Pflanzen, und warum sind sie ihrer Umwelt so gut angepasst?

Er ahnte die Möglichkeit weiterer Verallgemeinerungen nicht. Aber die Auslese aus dem Rauschen ist ein allgemeines Prinzip zur Gewinnung von Information aus einem Informationspotential (man nennt es manchmal die "Methode von Versuch und Irrtum"). Es besteht darin, dass aus einer Menge zufälliger Signalkombinationen diejenigen ausgelesen werden, die gewissen im voraus gegebenen Bedingungen genügen, d. h. dazu führen, dass das System einem seiner Ziele näherkommt.



Bild 7.10.: Der große englische Biologe Charles Darwin wendete als erster die damals noch nicht formulierten Gesetze der Kybernetik zur Erklärung der Zielstrebigkeit in der Welt der Lebewesen an. Hier untersucht er gerade das Verhalten eines Wurms. - Dieses interessante Problem wird in dem Kapitel "Verhalten" berührt.

Die ausgelesenen Signalkombinationen tragen also Informationen über den Weg zu diesem Ziel. Nur ein Denker bemerkte, dass DARWIN nicht nur der Teleologie einen Schlag versetzt hatte, sondern auch "empirisch ihren rationalen Kern erklärt hatte", und bezog seine Theorie auf ausnahmslos alle Fälle der Zielstrebigkeit und der Steuerung in der Natur. Das war Karl Marx.

Ein DNS-Molekül hat eine (für Moleküle) ungewöhnlich große Länge; es enthält wenigstens zweitausend Paare von Basen, d. h., wenn man etwa das Paar "Adenin-Thymin" mit 0 und das Paar "Zytosin-Guanin" mit 1 kodiert, dann braucht man zur Beschreibung eines DNS-Moleküls eine Folge von Nullen und Einsen mit wenigstens zweitausend Stellen, an denen entweder eine Null oder eine Eins steht.

Zweitausend binäre Einzelsignale können sogar bei einer großen Redundanz des Codes eine genaue Auswahl aus der großen Anzahl der Kombinationen von Aminosäuren im Eiweiß sichern. Nach Berechnungen von L. Pauling gibt es in der lebenden Natur ungefähr 100 000 verschiedene Eiweiße. Für eine Auswahl eines Eiweißes aus dieser Menge sind nur 17 binäre Einzelsignale erforderlich! Natürlich ist die Anzahl der möglichen Eiweiße weit größer.

Zur Zeit sind mehr als zwanzig Aminosäuren bekannt. Würde man je ein Molekül von allen ihren Kombinationen nehmen und aus ihnen eine fingerdicke Schnur machen, so hätte diese Schnur eine Länge von mehr als 75000 .... Was denken Sie? Millimeter? Kilometer? Nein: Lichtjahre!

Es wäre möglich, mit dieser Schnur den Sternhaufen unserer Galaxis (die Milchstraße) zu umwickeln, zu dem die Sonne als gewöhnliches und unbedeutendes Mitglied gehört. Und das wäre eine Schnur aus "Fasern", die mit dem stärksten Mikroskop kaum zu unterscheiden sind, und zwei gleiche "Fasern" würde man in ihr nicht finden!

Und doch reichen auch bei dieser Anzahl von Varianten theoretisch 300 binäre Einzelsignale zur Auswahl einer Kombination völlig aus: die übrigen sind überflüssig.

Alle hochorganisierten Lebewesen kodieren die Erbinformation zweistufig, um die Redundanz zu verringern: Zuerst bestimmt das durch ein DNS-Molekül realisierte Kodewort die Auswahl der Nukleotide, die die RNS bilden, und erst die einfacheren RNS-Moleküle bestimmen die Auswahl der Aminosäuren bei der Synthese der Eiweiße.

Im Jahre 1954 versuchten Physiker mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine, ausgehend von einigen bekannten Anordnungen der Aminosäuren in den Eiweißen den Code der DNS zu entschlüsseln. Die Dürftigkeit des Tatsachenmaterials und die Unvollkommenheit der Methode, die zu einer riesigen Anzahl von Proben zwangen, machten einen Abschluss dieser Arbeit unmöglich.

Man hat berechnet, dass eine Maschine mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von einer Million Operationen in der Sekunde bis heute nicht alle Proben durchgeführt hätte, selbst wenn sie zur Zeit des römischen Imperiums in Gang gesetzt werden wäre. Das interessanteste Ergebnis dieser Arbeit war der Hinweis auf den hohen Informationsgehalt des Vererbungskodes: Verbotene oder

bevorzugte Kombinationen von Aminosäuren wurden nicht gefunden.

Die Lage, die ziemlich düster ausgesehen hatte, hellte sich auf, als es dem amerikanischen Biochemiker M. Nirenberg 1961 glückte, zum ersten Mal die Synthese eines eiweißähnlichen Polymers in Anwesenheit einer Ribonukleinsäure mit einer genau bekannten Basenreihenfolge zu beobachten.

Diese Reihenfolge war allerdings sehr einfach: Die ganze Ribonukleinsäure war nur durch Polymerisation von Nukleotiden mit Urazil entstanden. Es war also der Kode

*...UUUUUUUUUUUUUUUUUUUU...*

bekannt, und obwohl in der Lösung alle 20 Aminosäuren vorhanden waren, trat in den neu gebildeten "Eiweiß"-Polymeren nur eine auf, nämlich Phenylalanin.

Nach der Informationstheorie muss, da die Einzelsignale (Basen) vier mögliche Werte haben und  $2 < \log_4 20 < 3$  ist, ein Kodewort zur Auswahl einer der 20 Aminosäuren (das diese Aminosäure kennzeichnet) aus mindestens drei Einzelsignalen bestehen. Das Kodewort des Phenylalanins ist daher nach den Versuchen von Nirenberg das folgende:

*...UUU – UUU – UUU – UUU – UUU...*

Später wurde eine Nukleinsäure allein mit Zytosin polymerisiert, und in ihrer Anwesenheit erhielt man ein Polymer, das nur aus Molekülen der Aminosäure Prolin bestand. Damit waren bereits die Bedeutungen zweier Kodewörter bekannt:

UUU - Phenylalanin;      ZZZ - Prolin.

An der Universität von Cambridge wurde unter der Leitung von F. Crick eine Serie von sehr subtilen Versuchen an Bakteriophagen durchgeführt, die bestätigten, dass der genetische Kode mit "dreibuchstabigen Wörtern" arbeitet, deren Anfänge eindeutig bestimmt sind.

Das bedeutet folgendes. Nehmen wir an, in der Ribonukleinsäure stecke die Folge von Einzelsignalen

*...UUUUGAGAUUUUZAUUAU...*

Diese lässt sich folgendermaßen in Dreierkombinationen aufspalten:

*...UUU – UGA – GAU – UUU – ZAU – UAU...*

und führt zur Synthese eines Eiweißes, in dem folgende Reihenfolge der Aminosäuren vorkommt:

... Phenylalanin - Methionin - Tyrosin - Phenylalanin - Threonin - Leuzin ...

Wir können diese Folge aber auch anders in Dreiergruppen zerlegen, nämlich z. B.

*...U – UUU – GAG – AUU – UUZ – AUU – AU...*

Dieser Zerlegung entspricht ein Eiweiß mit anderen Aminosäuren in anderer Reihenfolge als oben, nämlich:

... - Phenylalanin - Glyzin - Isoleuzin - Serin - Isoleuzin - ...

Es kommt also wesentlich darauf an, wo wir bei der Einteilung in Dreiergruppen die Zäsuren setzen - diese Stellen (die Wortanfänge) müssen eindeutig bestimmt sein, damit das Eiweißmolekül durch die RNS eindeutig bestimmt ist. Ebenso kann in der RNS kein "Buchstabe" fortgelassen werden, ohne dass ein ganz anderes Eiweißmolekül entsteht.

F. Crick und seine Mitarbeiter stellten fest, dass die Eigenschaften des Eiweißes in zwei Fällen fast ungeändert bleiben. Wenn man einen "Buchstaben" streicht und dafür an seine Stelle einen anderen setzt, gleichgültig welchen, oder drei "Buchstaben" gleichzeitig streicht, so ändert sich in der Zusammensetzung des Eiweißes nur eine Aminosäure, oder sie fällt ganz heraus, und das kann die Form eines Makromoleküls nicht wesentlich verändern:

UGU-UGA-GAU-UUU-ZAU-UAU ...  
(Zystein - Methionin - Tyrosin - Phenylalanin - Threonin - Leuzin - ...) bzw.

UUZ-UGA-GAU-UUU-UAU-UAU ...  
(Serin - Methionin - Tyrosin - Phenylalanin - Leuzin - Leuzin - ...)

Anfang 1962 wurde die Zusammensetzung der "Wörter" des Vererbungskodes für alle Aminosäuren bekannt, allerdings bedurfte die Reihenfolge der Buchstaben in diesen "Wörtern" noch einer Präzisierung.

Im Sommer 1962 schuf der Swerdlowsker Biophysiker N. Lutschnik unter Ausnutzung von Angaben über "Substitutionen" der Aminosäuren in den Eiweißen eine Variante des RNS-Kodes mit einer festen Anordnung der Basen. Der Amerikaner Kornberg zeigte, dass die Reihenfolge "Adenin-Thymin" zur Synthese des Kodes "Urazil-Adenin" in der RNS führt.

Der Umfang der Untersuchungen nahm stürmisch zu, und es winken uns fast märchenhafte Perspektiven. Vor uns steht die vollständige Entzifferung des Vererbungskodes, danach kommt die experimentelle Synthese von Eiweißen, von Antikörperchen, die wir benötigen, und später folgen Viren und ganze Zellen, Pflanzen und Tiere!

Mit seinen Kenntnissen wird der Mensch bald das bewusst wiederholen können, was vor Millionen von Jahren vor sich ging, er wird aus "unbelebten" chemischen Stoffen ein selbstorganisierendes chemisches System, Leben, schaffen. Stellen wir uns unseren großen Planeten zu jener Zeit vor. Entblößte Schichten gediegenen Metalls und wilde kristallklare Wasserfälle glänzten zwischen spitzen Granittrümmern.

Mit der ruhigen Hartnäckigkeit eines Wahnsinnigen mischte die Natur, so wie sie es auch heute noch tut, in jenen längst vergangenen Jahrtausenden die Atome und Moleküle in den Uferzonen der Urmeere so lange, bis sich in einem winzigen Tropfen des Salzwassers der "Kristallisationskern" des Lebens, das erste Nukleoproteid, bildete.

Die Entstehung des Lebens machte eine wiederholte Urzeugung unmöglich. Wenn sich nämlich ein stabiles und vermehrungsfähiges Nukleoproteid durchgesetzt hat, dann dienen ihm alle neuen Polymere, die in einer unbelebten Umgebung als Vorstufen des Lebens anzusehen wären, als Nahrung, d. h. werden nach seinem Vorbild zu Makromolekülen polymerisiert.

Schon Darwin stellte fest, dass die Entstehung von Leben nur in einer sterilen, unbelebten Umgebung möglich ist.

Mit der Entstehung eines Nukleoproteids eröffnete sich die Möglichkeit eines lawinenartigen Anwachsens der Organisation der Materie auf dem ganzen Planeten. Nehmen wir an, dass sich ein Ursystem, das eine mehr oder weniger gelungene Organisation hat, in zehn Sekunden einmal in zwei Teile teilt. Dann wächst die Anzahl seiner Nachkommen in geometrischer Folge

(nach Potenzen der Zahl 2):

2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048...

Nach einer Stunde hätte die Zahl der Nachkommen  $2^{360}$  erreicht, Wenn sich der Prozess in dieser Weise fortsetzen ließe. Nun ist aber, wie bereits erwähnt wurde, sogar die Anzahl der Atome in einem Körper von der Größe des Sonnensystems nur gleich  $2^{200}$ .

Es gäbe in den Ozeanen nicht genügend Vorräte an Nahrungsmitteln, um die Lebenstätigkeit aller dieser gelungenen Nachkommen auf Kosten der weniger gelungenen aufrechtzuerhalten. Die erste Besiedlung der Erde ähnelte einem wenige Minuten dauernden Aufflammen, dann aber gewann jedes in einem Organismus zufällig auftauchende Merkmal eine entscheidende Bedeutung für die ganze lebende Welt.

Es setzten sich jene Uroorganismen durch, die fähig waren, sich neben aktiven Fermentkatalysatoren eine sie umgebende Hülle zu schaffen, die für die hochmolekularen Verbindungen, von denen es rundum wimmelte, undurchdringlich war. Diese Hülle muss aber vom Organismus hergestellte Fermente herauslassen und Nahrungsverbindungen vom Typ der Kohlenwasserstoffe, Aminosäuren, Phosphate und Basen eintreten lassen.

Wenig bewegliche Nukleoproteide, die ihr Organisationsniveau auf Kosten einer Entropieerhöhung ihrer näheren Umgebung aufrechterhielten, gingen zugrunde, und an ihre Stelle traten andere, die zur Synthese der notwendigen Stoffe fähig waren, oder Räuber, die für ihre Konkurrenten vernichtende Fermente entwickelten.

Es fand ein regelrechter chemischer Krieg "aller gegen alle" statt, und sein Endergebnis war eine allgemeine Vervollkommnung.

Lebewesen und Umwelt standen von Anfang an in einer positiven Wechselwirkung: Die Existenz des Lebens veränderte die Umwelt, und die Veränderung der Umwelt zwang das Leben, neue Formen anzunehmen.

Für die Urzellen lag die wichtigste Informationsquelle in dieser Rückkopplung durch die Umwelt, die zufällig entstehende Abweichungen von der Norm im Laufe der Entwicklung verstärkte oder abschwächte, je nachdem ob diese Abweichungen zu einer besseren oder schlechteren Anpassung an die Umweltbedingungen führte.

Verstärkung bedeutet daher, dass Zellen mit dem zu verstärkenden Merkmal in größerem Maße auftreten, dass sich dieses Merkmal durchsetzt. Abschwächung bedeutet, dass Zellen mit diesem Merkmal im Kampf aller gegen alle aussterben. Der energetische Überfluss der "Urbrühe" verschwand, und die Organismen passten sich schon den Ergebnissen der eigenen Anpassung an.

Beide Prozesse, der äußere und der innere, liefen parallel stetig, fließend ab, nur aus diesem Grunde konnte die "Auslese des Besten" funktionieren. Diese Tatsache ist schon lange bekannt und als sogenanntes biogenetisches Grundgesetz von Müller-Haeckel formuliert:

Der Vererbungsapparat ist zu einem einschneidenden vollständigen Umbau seiner Kodes nicht fähig; er speichert "Verbesserungen" und führt diese dann der Reihe nach durch, so dass die höheren Organismen bei ihrer Entwicklung aus der befruchteten Eizelle alle wesentlichen Stufen durchlaufen, auf denen ihre Vorfahren standen.

Eine einschneidende Änderung der Bedingungen in der Umwelt würde alles Lebende töten, dem es nicht gelungen ist, Information zu sammeln, die für eine Anpassung an die neuen Bedingungen ausreicht. Eine solche Informationssammlung dauert aber einige Zeit. Daher kann sich das Leben nur an solche Veränderungen anpassen, die langsam vor sich gehen.

Die Ionenprozesse, die im Plasma vor sich gehen, sind empfindlich gegenüber der Sonneneinstrahlung, der Wärme, dem Druck, den Veränderungen des elektrischen Feldes und der chemischen Zusammensetzung der die Zelle umgebenden Flüssigkeit. Die natürliche Selektion kann entweder zu einer Herabsetzung der Empfindlichkeit führen oder zu einer Steigerung und damit die Entwicklung der Urorganismen zu Pflanzen oder zu Tieren fördern.

Ursprünglich erhielten die Nukleoproteide die Energie für ihre Synthese, indem sie instabile und energiereiche Verbindungen wie Adenosintriphosphat (ATP) zerlegten. Zu der Zeit, als der ATP-Vorrat der Umwelt zur Neige ging, wurden jene Zellen ausgelesen, die Fermente für die Zerlegung von Zucker durch Gärung produzierten und die dabei frei werdende Energie durch Synthese von ATP speicherten.

Bei der Gärung wurde Kohlendioxid frei. Als die Vorräte von freiem Zucker zu Ende gingen, überlebten und verbreiteten sich die Zellen, die es "gelernt" hatten, Zucker aus Kohlendioxid und Wasser unter Ausnutzung der Sonnenstrahlung herzustellen. Vorher musste die Sonnenenergie in der Umwelt in chemische Energie verwandelt werden. Jetzt sind Zellen entstanden, die die Strahlungsenergie selbst ausnutzen.

Dabei wurde Sauerstoff frei, und mit seiner Hilfe gelang es den Zellen, die chemische Energie der Zucker in höherem Maße freizusetzen, indem sie die Art des Abbaus änderten, nämlich von der Gärung zur Oxydation übergangen. Die zerfallenden Reste von Lebewesen begünstigten die Bildung eines Bodens.

So änderten sich die Atmosphäre und die Oberfläche des Planeten und das Gebiet, in dem Leben existieren konnte, breitete sich über den ganzen Planeten aus, über das ganze Festland und über alle Gewässer.

Die Informationsmenge, die in einer Nachricht über eine gewählte Fortsetzung eines Prozesses enthalten ist, hängt bekanntlich von der Wahrscheinlichkeit dieser Fortsetzung ab. Eine einzelne Zelle und eine Million Zellen, die eine große Kolonie bilden, enthalten daher die gleiche Informationsmenge, wenn zwischen den Zellen in der Kolonie keine funktionellen und strukturellen Unterschiede bestehen.

Eine nützliche Abweichung von der Norm kann sich auf eine mehr oder weniger große Anzahl von Zellen ausdehnen; die Informationsmenge, die in der Abweichung enthalten ist, hängt von dieser Zahl nicht ab. Es ist sehr wahrscheinlich, dass jede neue Zelle eine genaue Kopie ihrer Vorgängerin auf der Stufenleiter der Zellteilung ist.

Im Gegensatz dazu hat das Aufhören der Teilung auf einem Niveau, das für den gesamten Organismus zweckmäßig ist, eine gewisse Unwahrscheinlichkeit: Es ist ein besonderes Hormon nötig, um das zu erreichen, es ist eine Rückkopplung nötig, die dem Steuerzentrum das Volumen des Gewebes mitteilt. Das Steuerzentrum beeinflusst dann das Tempo der Zellteilung so, dass ein bestimmtes Volumen nicht überschritten wird.

Die Zellteilung erfolgt bei der überwältigenden Mehrheit aller lebenden Organismen durch ein besonderes Verfahren, das man als "Mitose" bezeichnet. Es sichert die Erbinformation und wurde im Laufe des langen Entwicklungsprozesses, eines Prozesses der Informationssammlung, ausgearbeitet

Beim Beginn der Mitose halten Anhäufungen von DNS-Molekülen Eiweiße bei sich zurück und verwandeln sie in mikroskopisch erkennbare fadenförmige Gebilde, die Chromosomen. Gewöhnlich entstehen in allen heute lebenden Zellen, die einzeln oder in mehrzelligen Organismen existieren, mehrere Chromosomenpaare, während die Zellhülle verschwindet. Ferner vergrößert sich die elektrische Aktivität der Eiweißgebilde im Plasma, der Zentrosomen, der



Ionenaustausch zwischen ihnen erhöht sich, und die in Richtung der Austauschwege orientierten Polymere bilden den sogenannten Mitosestern. Die weitere Vergrößerung der elektrischen Abstoßung zwischen den Zentrosomen führt zur Spaltung der Chromosomen und dann zur Teilung der ganzen Zelle.



Bild 7.11.: Den komplizierten Umbau der Zelle bei der Teilung nennt man Mitose. Zu Beginn der Mitose (siehe links) streben die einander kontrollierenden DNS-Moleküle auseinander und bilden Fadenpaare, die Chromosomen. Sie ordnen sich zwischen den Polen der Abstoßungskräfte an, spalten sich auf, regenerieren sich hier auf Kosten freier Nukleotide und streben zu den Polen. Es bilden sich zwei ähnliche Kerne, und die Zelle teilt sich in zwei Teile.

Im Jahre 1957 markierte der Mikrobiologe Taylor alle Wasserstoffverbindungen eines Chromosomensatzes durch radioaktives Tritium und bestimmte dann die Radioaktivität der Zellen, die bei der Teilung entstanden. Die ersten beiden Zellen, die je eine Hälfte des gezeichneten Chromosomensatzes erhielten, waren radioaktiv. Bei zwei von ihren vier Nachkommen stellte man Radioaktivität fest. Im weiteren waren immer nur zwei der sich schnell vergrößernden Anzahl der Zellen radioaktiv, obwohl sie sich ebenso wie die anderen teilten.

Das Ergebnis des Versuchs zeigte anschaulich, dass sich die Halbchromosomen nicht weiter teilen und nicht zerfallen; sie gehen als ganze Gebilde von Zelle zu Zelle und konstruieren genaue Kopien ihrer selbst aus dem Material des Plasmas.

Die Durchführung der Mitose setzt einen neuen sehr wichtigen Schritt in der Entwicklung des intrazellulären Signalsystems voraus, nämlich die Fähigkeit zur zeitlichen Abwicklung eines Programms. Vorher bestand das Vererbungsprogramm - ein DNS-Makromolekül - nur aus einem komplizierten Signal, das die Bildung einer Serie von spezifischen Eiweißen steuerte. Jetzt ist die DNS-Masse im Kern nicht mehr an ihrer ganzen Oberfläche aktiv, sondern nur in gewissen Aktivitätsherden, die sich von Molekül zu Molekül verschieben. Zu diesen Herden gelangt die Energie des ATP, hier vollzieht sich die Synthese von RNS-Molekülen, die in das Plasma wandern und dort als Katalysatoren der Eiweißsynthese wirken.

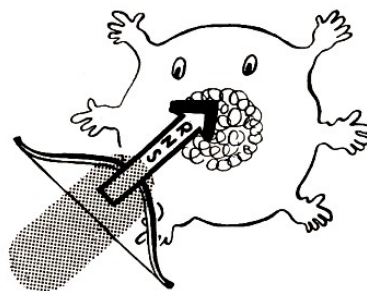


Bild 7.12.: Das Virus behält sein Eiweiß und spritzt seine Nukleinsäure direkt in die Zelle. Im Plasma beginnt diese Nukleinsäure sich auf Kosten freier Nukleotide zu vermehren, und dann reproduziert sie das Viruseiweiß.

Der Übergang zu einer zeitlichen Abwicklung des Programms ordnet sich dem Wachsen der Gesamtaktivität des Plasmas unter, das durch die Anhäufung von Nahrungstoffen und bei mehrzelligen Organismen auch durch besondere Stoffe - Hormone - hervorgerufen wird. Der

Kern ändert der Reihe nach die Signale, die die Eiweißsynthese und damit alle Lebenserscheinungen in der Zelle steuern. -

Aus der Tatsache, dass die Erbinformation alle Merkmale des künftigen Organismus enthält, folgt natürlich nicht, dass jede Struktur des Organismus, jede Zelle und jede intrazelluläre Bildung im DNS-Code repräsentiert wird. Ein und dasselbe Signal ist in der Lage, den Aufbau einer ganzen Menge gleichartiger Strukturen oder die Richtung einer Änderung der Struktur zu bestimmen.

In Irland lebte vorzeiten ein Hirsch, dessen Geweih von Generation zu Generation immer mächtiger wurde, die Entfernung zwischen den Geweihenden erreichte dreieinhalb Meter. Der Hirsch konnte das Gewicht seines eigenen Geweihs nicht mehr tragen und starb aus.

Offenbar führte nicht die schrittweise Anhäufung von Merkmalen zu dem traurigen Ende des irischen Hirschs, sondern ein Signal, ein Hormon, das das Gewebe zu einem stärkeren Wachstum anregte, also die Richtung einer Veränderung festlegte. Die starke Vergrößerung der Gehirnhemisphären des Affen, mit der die Formierung des menschlichen Organismus begann, wurde möglicherweise durch eine Änderung der Erbinformation hervorgerufen und dann durch die Fähigkeit der Nachkommen, den großen Kopf zu tragen, reguliert.

... Man erinnere sich daran, wie uns auf den letzten Seiten des Romans Tote Seelen plötzlich der einfache Denker Kifa Mokijewitsch entgegentritt. Er war, wie Gogol schreibt, ein Mensch von, sanftem Wesen, führte ein nachlässiges Leben und beschäftigte sich mit verschiedenen komplizierten Problemen.

"Zum Beispiel das Tier", sagte er, im Zimmer auf und ab gehend, "das Tier wird nackt geboren. Warum denn nackt? Warum nicht wie ein Vogel: warum schlüpft es nicht aus dem Ei?"

Die Gedanken, die diesen Sonderling beschäftigten, stehen mit dem Inhalt vieler Probleme der Kybernetik in Zusammenhang. "Wenn sich aus einer Eizelle irgendeine Form entwickelt", so überlegt W. R. Ashby, "so fragt die Kybernetik: Warum ist das Ergebnis der Veränderungen ein Kaninchen und nicht ein Hund, ein Fisch oder gar eine Missgeburt?"

Hinter dem übereinstimmenden "Warum?" des Kifa Mokijewitsch und der modernen Kybernetik verbergen sich drei Fragen: Was ist der Zweck der verschiedenen Formen von Lebensprozessen, wie entstanden diese Formen historisch, und wie erfolgt die Herausbildung dieser Formen, wenn ein neues Lebewesen entsteht?

Jede dieser Fragen gehört in allen ihren Einzelheiten zum Kompetenzbereich verschiedener Zweige der Biologie.

Die Kybernetiker sind nicht berechtigt, sie eindeutig zu beantworten, denn sie untersuchen nicht die Einzelheiten des Baus von Viren und Embryonen unter dem Mikroskop, sie führen keine Analysen oder Synthesen von Eiweißen durch, mit einem Wort, sie ermitteln keine neuen Fakten, die es ermöglichen, das Informationsvolumen eines gegebenen Wissenschaftszweiges zu vergrößern.

Durch die Anwendung der kybernetischen Prinzipien, z. B. einer Untersuchung der Rückkopplung "Organismus-Umwelt", der Programmsteuerung und der Wirkungsweise von lernenden Systemen, findet die Kybernetik nur Einschränkungen, denen vorgeschlagene Lösungen genügen müssen, und gibt damit Anhaltspunkte für die Wahl einer Arbeitshypothese unter den vielen möglichen Hypothesen.

Es gibt Hypothesen, deren Unmöglichkeit aus den Gesetzen der Kybernetik folgt, nicht aber aus Betrachtungen der Biologie. Der Biologe Lamarck vermutete, dass den Pflanzen und Tie-

ren ein ursprüngliches inneres Streben nach Vollkommenheit eigen ist, während der Biologe Darwin annahm, dass Mutationen, Vererbung und Selektion zur Anpassung an die Umwelt notwendig sind.

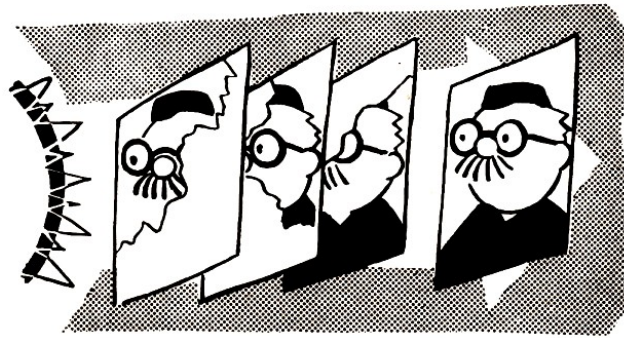
Die kybernetische Analyse und Experimente an Maschinen bestätigen Darwin Ideen, die mit den Theorien von Informationssammlung und Lernen vollständig übereinstimmen.

Ein solches Experiment wurde zum Beispiel 1961 im Rechenzentrum der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Kiew durchgeführt. Die Maschine führte Operationen mit Zahlen aus, die die Ernährung, den Kampf ums Dasein und das Entstehen erblicher Merkmale, d. h. Mutationen, abstrakt darstellen. Die Voraussetzungen des Experiments - die Vorstellungen von der Entstehung des Lebens auf der Erde - lieferte die Biologie; die Theorie der Automaten und die numerische Mathematik bestätigten und präzisierten diese Vorstellungen durch genaue quantitative Angaben.

Die Biologin O. Lepeschinskaja glaubte, dass Zellen aus nichtzellförmigem Stoff erzeugt werden könnten und dass ihre Organisation dabei aus dem "Nichts" entsteht; das ist aber nach den Gesetzen der Kybernetik unmöglich.

In jeder Frage liegt, so behauptet die Informationstheorie, eine Einschränkung der möglichen Antworten, also eine Information. Indem die Kybernetik die Fragen des Kifa Mokijewitsch auf ihre Art und genauer stellt und damit die Unvollständigkeit der in ihnen enthaltenen Information verringert, hilft die Kybernetik der Biologie und anderen Wissenschaften, sich in ihrem eigenen Gebiet zurechtzufinden, und bereichert gleichzeitig sich selbst.

## 8 Kontrolle, eine der Eigenschaften der Rückkopplung



Wider den gesunden Menschenverstand - Die Statistik und die Grundgesetze der Physik - Eine höhere Theorie der Druckfehler - Von Neumanns Maschinenungeheuer - Maßnahmen gegen die Degeneration von Maschinen - Von der Maschine zum lebenden Organismus - Ein heftiger Streit - Was ist das Alter? - warum sind die Kinder jünger als der Vater? - Parthenogenese und Heterogonie - Das phantastische Virus der Unsterblichkeit.

Vor acht Jahren führten die beiden französischen Mikrobiologen G. Roman und F. Jacob einen sehr schwierigen und interessanten Versuch mit Hefekolonien durch. Bei diesen Einzellern kann man genau feststellen, welcher Teil der Erbinformation durch eine bestimmte Dosis ionisierender Strahlen (Röntgenstrahlen oder ultraviolette Strahlen) zerstört wird.

Manchmal verursacht die Strahlung bei der Zelle nur, dass sie die Synthese eines Stoffes, beispielsweise einer Aminosäure, nicht mehr durchführen kann. Die Zelle kann ihr Eiweiß ohne diese Aminosäure nicht aufbauen, und wenn man sie in der normalen Umgebung belässt, so geht sie zugrunde.

Wenn man jedoch den fehlenden Stoff in die Umgebung einbringt, dann lebt die Zelle ganz normal und bildet die übliche Kolonie. Allerdings wird die Unfähigkeit zum Aufbau dieser Aminosäure auf alle ihre Nachkommen vererbt. Es können also auch die Nachkommen nicht ohne die fertige Aminosäure leben.

Zunächst bestrahlten Roman und Jacob Sporen der Hefe und stellten fest, dass die Strahlungsdosis bei zwei Sporen die gleiche Missbildung hervorrief: sie verloren die Fähigkeit zur Synthese ein und derselben Aminosäure. Dann vereinigten sich die Sporen zu einer gewöhnlichen Zelle, einem Gameten. Diese Zelle setzten die Wissenschaftler einer leichten ultravioletten Strahlung aus, und die Missbildung verschwand.

Die Zelle begann sich in der gewöhnlichen Umgebung zu vermehren und eine vollwertige Nachkommenschaft zu liefern.

In unserer Zeit, in der sich die Atomtechnik stürmisch entwickelt und die Schäden durch Strahlung manchmal zu einer ernstesten Gefahr werden, rief das Ergebnis des Versuchs natürlich großes Interesse hervor. Strahlen heilen eine Strahlenkrankheit!

Hierin sah man eine neue Art Homöopathie, die dem Prinzip folgt: "Ähnliches mit Ähnlichem zu heilen". Leider macht die allgemeinste Theorie, die man auf diesen Fall anwenden kann, nämlich die statistische Physik, unsere Hoffnungen zunichte.

Eine ionisierende Strahlung kann von sich aus nur zerstören und nicht wiederaufbauen, sie kann die Informationsmenge im Vererbungsapparat der Zelle nur verringern und nicht vergrößern. Wenn der einfallende Strahl das Innere der lebenden Zelle erreicht, d. h. ihre Nukleinsäuren, und die plötzlich entstehenden Ionenströme die molekularen Buchstaben, in denen die Erb-

information niedergeschrieben ist, zerreißen und durcheinanderbringen, so kann die Zelle die frühere Ordnung nur durch Versuch und Irrtum wiederfinden, d. h. durch die natürliche Selektion.

Die Gesetze der statistischen Physik verbieten die Rückkehr zu dem Alten nicht absolut, dafür sind sie statistische und keine absoluten Gesetze! Aber sie besagen, dass es höchst unwahrscheinlich ist, dass wir oder tausend Forschergenerationen nach uns eine solche Rückkehr beobachten können.

Aus den Sätzen der statistischen Physik kann nicht gefolgert werden, dass Ereignisse, die praktisch nie auftreten, unmöglich sind. Im Zimmer sind zum Beispiel schnelle und langsame Moleküle der Luft gleichmäßig verteilt, d. h., die Lufttemperatur ist überall gleich. Die Wege der Moleküle sind aber zufällig, und eigentlich steht dem nichts entgegen, dass sich die "kalten" Moleküle, die eine geringe Geschwindigkeit haben, an einer Stelle und die "warmen", schnellen Moleküle an einer anderen Stelle sammeln.

Ein Schrank stellt einen Schwarm von Molekülen dar, die sich in verschiedenen Richtungen bewegen. Würden die Richtungen ihrer Wege übereinstimmen (würden etwa alle Moleküle nur nach oben streben), so würde sich der Schrank ohne äußere Anwendung einer Kraft heben.

Beide Ereignisse widersprechen zwei Grundgesetzen der Thermodynamik, dem Gesetz von der Erhaltung der Energie und dem Gesetz von der Nichtabnahme der Entropie, und trotzdem sind sie nicht unmöglich, sondern nur äußerst unwahrscheinlich.

Man kann einwenden - und wie oft wird das getan! -, dass die Sätze der statistischen Physik nicht die Eigenschaften eines lebenden Organismus festlegen können.

Bekanntlich wurde schon von Aristoteles die Behauptung aufgestellt, dass sich die Welt in einer Richtung entwickelt: vom Einfachen und Unvollkommenen zum Komplizierteren und Vollkommenen. Diese Verallgemeinerung ließ sich gut aus den Ergebnissen der Biologie herleiten, sie widersprach aber direkt dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik: Physik und Biologie nahmen hier völlig entgegengesetzte Standpunkte ein.

Unter Physikern sah man ein System, das zu einer zweckmäßigen Anisotropie überging, nicht als "natürlich" an. Demgegenüber sahen solche Philosophen wie Schelling und solche Biologen wie Lamarck in der Geschichte der physikalischen Welt - in der Bildung der Erde und der Voraussetzungen der irdischen Natur - eine Periode der zielstrebigem Vorbereitung für das Auftreten von Lebewesen und schließlich des Menschen.

Die Sache verhält sich folgendermaßen: Die Materie als Ganzes trägt die Quelle der Bewegung und Entwicklung in sich selbst; es gibt keine überirdischen Kräfte die sie bewegen oder entwickeln.

Aber diese richtige philosophische These darf man nicht auf einzelne und außerdem abgeschlossene Systeme anwenden: Wenn eine Kugel auf einer Ebene rollt, so hat zweifellos auf sie eine äußere Kraft gewirkt; wenn sich eine Zelle oder ein ganzer Organismus vervollkommnet, so bestimmen die Umweltbedingungen die Entwicklung dieser Zelle bzw. dieses Organismus.

Wie jeder geordnete Zustand der Materie ist jedes Kodewort dem Einfluss sogenannter Störungen ausgesetzt, d. h. zufälligen Einflüssen, die die Form der Einzelsignale verzerren. Da das Kodewort nicht zufällig, sondern gesetzmäßig entstanden ist, wirken die Störungen gerichtet, sie verzerren diese Gesetzmäßigkeit, und bei gewöhnlichen Umformungen kann sich die Verzerrung der Information nur vergrößern und nicht verringern.

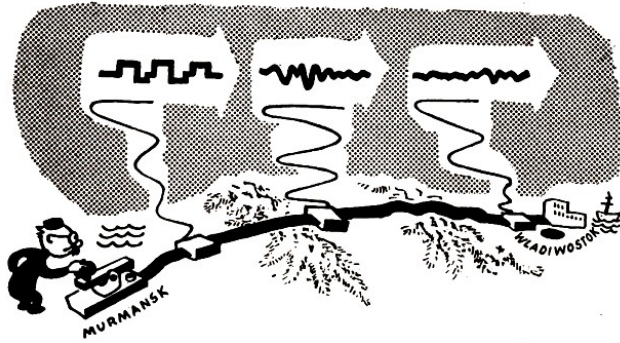


Bild 8.1.: Jedes Signal verändert sich unter dem Einfluss von Störungen und verliert Information, die es zum Empfänger bringen könnte.

Es ist praktisch unmöglich, dass in einem telegrafisch übertragenen Text nach einer Reihe von Übertragungsfehlern eine vorher nicht vorhandene vernünftige Überlegung auftaucht. Wenn man einen Text hinreichend oft telegrafisch überträgt, so erreicht die Verzerrung im Gegenteil ihr Maximum. Es ist dann vollkommen gleich, ob man diesen gänzlich verzerrten Text liest oder ob man Buchstaben durcheinanderschüttelt, zu Zeilen ordnet und liest. In beiden Fällen erhalten wir reines Rauschen.

Natürlich entstehen jedesmal verschiedene Kombinationen der durcheinandergebrachten Buchstaben, aber für uns sind sie nicht zu unterscheiden.

In später Nacht, wenn der Satz bereits im Druck ist, erinnern sich alte Setzer gern daran, welche großen Skandale einst durch Druckfehler entstanden. Vor langer Zeit gab es die Suworinsche "Neue Zeit" und die Pogodinsche "Rus", zwei konkurrierende Zeitungen. Die Veteranen unter den Setzern erinnern sich, wie die "Rus" Suworin wegen eines Druckfehlers in einer Annonce verklagte, in der groß geworben wurde:<sup>30</sup>

DAS ABONNEMENT FÜR DIE ZEITUNG  
"GUS"  
WIRD VERLÄNGERT.

Aufsehenerregend waren auch die folgenden Druckfehler:

"... Den Weg, den die höchsten Persönlichkeiten nahmen, säumten die Matratzen der Garde-division" (statt: Matrosen)<sup>31</sup>

"Er widmete sein ganzes Leben der Degeneration der Kunst" (statt: Regeneration).

Obwohl Korrektoren und Redakteure alles, was gedruckt wird, vorher mehrere Male lesen, taucht auch heute ab und zu im Text ein skandalöser Fehler auf.

Bei der Übertragung von reinem Rauschen kann es prinzipiell keine Übertragungsfehler (z. B. Druckfehler) geben: seine Entropie ist maximal. Je mehr Information ein gegebener Drucktext aufnimmt, desto weniger wahrscheinlich werden die Kombinationen der Zeichen. Immer geringer wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine versehentliche Änderung des Textes, die durch eine falsche Handbewegung des Setzers, eine Störung im Mechanismus der Setzmaschine oder die Müdigkeit des Nachtkorrektors entstand, für den Text vorteilhaft ist.

In einem Glückwunschtelegramm, das durch einen nicht intakten Apparat übermittelt wird, kann ein gewöhnlicher "Gruß" zu "Ruß" oder "Grieß" werden, aber nicht zu "ich liebe dich", obwohl der Absender vielleicht gerade das geträumt hat und nicht wagte, es zu schreiben.

<sup>30</sup>(gesprochen: guß, russ.) Gans

<sup>31</sup>Das Wort "Matratzen" unterscheidet sich im Russischen von "Matrosen" nur durch einen Buchstaben.

Die durch Störungen hervorgerufenen Verzerrungen machen die Signale nach und nach für die Verwendung in einem Steuerungsprozess unbrauchbar. Aber dabei "verschwindet" die Information nicht immer sofort, sozusagen auf einen Schlag, nicht immer wird sie vollständig vernichtet. Selbst wenn jemand einen Text verschlüsselt und dann seinen Schlüssel (den Code) unwiederbringlich vergisst, kann die Information erhalten bleiben.

Stellen wir uns vor, dass der Originaltext irgendeines Buches verlorengegangen sei, dass aber fünf, sechs Übersetzungen in verschiedene Sprachen existieren, die von gleich unwissenden Übersetzern stammen. Keine von diesen Übersetzungen kann man einzeln für originalgetreu halten, aber durch ihren Vergleich kann man den früheren Inhalt mit großer Sicherheit wiederherstellen. Viele alte Texte glaubte man nie entschlüsseln zu können. Und heute haben Fachleute sie, gelesen - die ägyptischen Hieroglyphen, die Schriftzeichen der Hethiter, die Inschriften der amerikanischen Mayas: ja, sogar die berühmten "sprechenden Tafeln" der Osterinsel beginnt man zu entschlüsseln.

Die Information, die in ihnen enthalten ist, findet Eingang in die Geschichtsbücher, um nunmehr allen Menschen zugänglich zu sein. Die Erhaltung der Information bei einer "Beschädigung" kann man anschaulich an den Spielzeugwürfeln mit zerschnittenen Bildern auf den Seitenflächen demonstrieren.

Werden sie richtig gelegt, so fügen sich die Teilbilder zu einem sinnvollen Bild, bringt man aber die Würfel durcheinander, so verschwindet das Bild gewissermaßen. Ist es endgültig verschwunden? Natürlich nicht. Seine Elemente sind durcheinandergebracht worden, aber nach einer Reihe von Umstellungen kann das Bild wieder auftauchen.

Da binäre Einzelsignale eine einfache Form haben, ist es schwer, sie so zu verzerren, dass es unmöglich ist, die alte Form wiederherzustellen. Binäre Signale sind also stabil gegenüber kleinen Verzerrungen.

Die Lage "eingeschaltet" wird zum Beispiel von einem elektrischen Schalter mit Arretierung sehr viel zuverlässiger eingehalten als von einem kleinen Hahn, der sich leicht um seine Achse dreht. Die Lage des Hahns wird schon durch eine leichte Berührung gefährdet, während eine merkliche Kraft erforderlich ist, um einen Schalter aus seiner arretierten Lage zu bringen.

Wie bereits gesagt, hängt die erste Eigenschaft jeder Kodierung, nämlich ihr Informationsgehalt (bzw. die entgegengesetzte Größe, die Redundanz) davon ab, wieviel "überflüssige" Einzelsignale die Kodewörter im Mittel enthalten. Eine zweite sehr wichtige Eigenschaft von Kodierungen ist ihre Stabilität gegenüber Störungen, ihre Fähigkeit also, dem verzerrenden Einfluss der Störungen des Rauschens zu widerstehen.

Die Stabilität gegenüber Störungen wird gemessen durch die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Verzerrungen gegebener Art vollkommen beseitigt werden können. Zur Vergrößerung der Stabilität einer Kodierung ist es im allgemeinen notwendig, die Anzahl der Einzelsignale zu vergrößern und dabei so zu verfahren, dass gewisse Einzelsignale eine große und andere eine geringe Wahrscheinlichkeit besitzen bzw. beim Empfänger der kodierten Nachricht überhaupt nur durch eine Verzerrung des übertragenen Kodewortes eintreffen können.

Nehmen wir an, dass ein mit Ihnen befreundetes Ehepaar ein Kind erwartet und Ihnen nach der Geburt telegrafisch mitteilen will, ob es ein Junge oder ein Mädchen ist. Sie können verabreden, dass das Ereignis "Junge" mit 0 und das Ereignis "Mädchen" mit 1 kodiert wird.

Da beide Ereignisse etwa gleich wahrscheinlich sind, ist diese Kodierung in Bezug auf den Informationsgehalt maximal. Wenn Sie ein Telegramm „0“ erhalten und bei dessen Übertragung kein Fehler mitgewirkt hat, so wissen Sie, dass ein Junge angekommen ist.

Diese Kodierung ist aber sehr störanfällig, alle Information liegt in einem Einzelsignal. Wenn es verzerrt wird, dann verschwindet die Information im allgemeinen völlig. Anders dagegen, wenn sie verabreden, dass das Ereignis "Junge" mit 000 und das Ereignis "Mädchen" mit 111 kodiert wird. Dabei ist es sehr unwahrscheinlich, dass bei der Übermittlung eines Telegramms mit dem Text 000 der Text 111 am Empfangsort eintrifft. (Das gleiche gilt für den umgekehrten Fall.) Wenn Sie also das Telegramm 111 empfangen, so besteht praktisch Gewissheit darüber, dass bei Ihren Freunden ein Mädchen angekommen ist. Erhalten Sie das Telegramm 001, so können Sie daraus schließen, dass die Übertragung gestört wurde - dieses Einzelsignal hat Ihr Freund bestimmt nicht abgesandt.

Da es wahrscheinlicher ist, dass bei der Übertragung des Signals nur ein Fehler vorkam (dass also 000 abgesandt wurde), als dass dabei zwei Fehler gemacht wurden (dass also 111 abgesandt wurde), können Sie in diesem Fall mit einer Wahrscheinlichkeit, die von der Fehlerquote des Übertragungskanals abhängt und in der Praxis ziemlich groß ist, annehmen, dass das Ereignis "Junge" eingetreten ist.

Bei der zuletzt beschriebenen Kodierung ist die Anzahl der Signalwerte 8 ( $= 2^3$ ), gegenüber 2 bei der ersten, und die Signalwerte besitzen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten, nämlich 000 und 111 solche, die nahe bei  $1/2$  liegen, während die anderen Signalwerte (z. B. 001, 010 usw.) überhaupt nicht ausgesendet werden.

Dadurch kann bei dieser Kodierung jeder ausgesendete Signalwert nur 1 bit Informationen übertragen, obwohl prinzipiell 3 bit möglich wären. Diese Kodierung ist also redundant. Allgemein gilt für beliebige Kodierungen:

Bei einer Vergrößerung des Informationsgehalts verringert sich die Stabilität gegenüber Störungen, und umgekehrt führt eine Erhöhung der Stabilität gegenüber Störungen zu einer Verringerung des Informationsgehalts.

Eine redundante Kodierung gibt also die Möglichkeit, Übertragungsfehler in einem gewissen Rahmen zu beseitigen. Zur Beseitigung der Fehler ist ein System erforderlich, das die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die Signalwerte oder Kodewörter gesendet werden, kennt und in Rechnung stellt, Kodewörter vergleicht und die Fehler erkennt.

Natürlich wächst bei einer Erhöhung der Zeichenanzahl die Möglichkeit, dass Fehler auftreten können, im gleichen Maße, und es mag seltsam scheinen, dass sich die Zuverlässigkeit der Informationsübertragung dabei dennoch erhöht.

Aber die Verteilung der Fehler im empfangenen Kodewort ist regellos, während die Reihenfolge der Signale in ihm gesetzmäßig ist. Jedes von drei Telegrammen, die ein und denselben Text übermitteln, kann verzerrt sein, aber diese Verzerrungen treffen verschiedene Buchstaben. Vergleicht man alle drei Telegramme, so kann man den Text wiederherstellen, selbst wenn sein Informationsgehalt groß ist.

Man kann das an einer Geschichte verdeutlichen, die sich am 26. Juli 1864 auf der Jacht "Duncan" eines gewissen Mr. Glenaryan zutrug. Wie sich der Leser vielleicht erinnert, entdeckte man an diesem Tage im Bauch eines getöteten Hais eine Flasche mit drei Kopien einer Notiz, die über das Schicksal des verunglückten Kapitäns Grant berichtete.

Keine dieser Kopien konnte man einzeln verstehen, so hatte das Meerwasser sie verdorben. Aber die scharfsinnigen Helden des Romans von Jules Verne lasen, indem sie alle drei verglichen, alles heraus, außer der geographischen Länge des Punktes, an dem sich die Schiffskatastrophe abgespielt hatte.



Für kompliziertere Schlussfolgerungen, die mit der Redundanz von Kodierungen und ihrer Fähigkeit, dem Rauschen zu widerstehen, zusammenhängen, ist diese Geschichte zu einfach. Wir gehen anders vor: Wir untersuchen eine gedachte Maschine von der Art des Maxwellschen Dämons oder der Turing-Maschine und führen mit ihr eine Reihe gedanklicher Experimente durch.

Im folgenden betrachten wir eine Maschine, die von dem Mathematiker John von Neumann erdacht wurde. Von Neumann zeigte, dass man eine Maschine berechnen und im Prinzip konstruieren kann, die automatisch Maschinen baut, die ihr völlig gleich sind, die also auch wieder automatisch diese Maschinen bauen. Würden wir ein solches "Neumannsches Ungeheuer" neben einem gigantischen Haufen mit Rohmaterial aufstellen, so erhielten wir nach einer gewissen Zeit Kolonnen von Maschinen, die das Material verarbeiten und ihre Anzahl lawinenartig vergrößern.



Bild 8.2.: Eine selbstreproduzierende Maschine kann man sich als ein solches ratterndes Ungeheuer vorstellen ...

Um der Aufgabe, eine selbstreproduzierende Maschine zu konstruieren, eine mathematische Form zu geben und sie quantitativ zu lösen, vereinfachte sie von Neumann.

Er nahm an, dass die Einzelteile, aus denen die Maschine aufgebaut ist, bereits vorgefertigt sind und die Form von Würfeln oder Quadraten gleicher Größe, genannt Zellen, haben. Die Maschine bewegt sich nicht, sondern schickt in die Zellen des umgebenden Raums gewisse regelnde Signale. Unter diesen Bedingungen erreicht eine Maschine aus 32000 Quadraten mit einem Programmstreifen aus 150000 Quadraten einen Organisationsgrad, der sie zur Selbstproduktion befähigt.

Uns interessiert dabei folgendes: Wenn wir annehmen, dass eine selbstreproduzierende Maschine gebaut ist, ist sie dann zu einer progressiven Entwicklung fähig, werden ihre Nachkommen in einem bestimmten Sinne vollkommener als sie selbst?

Von Neumann behauptete, dass sich die Nachkommen seiner Maschinen voneinander unterscheiden werden, obwohl sie nach einem Programm oder nach Kopien von diesem gebaut sind. Wie vollkommen man nämlich auch die Anlage baut, die die angegebene Arbeit ausführt, ihre Erzeugnisse können nicht allen zufälligen Einflüssen aus dem Wege gehen, die von der Qualität des Materials, der Temperatur, Unterbrechungen von Material- und Energiezufuhr und ähnlichen Störungen abhängen.

Daher, so dachte von Neumann in Erinnerung an die großen Ideen Darwins, werden sich unter den Maschinen bessere, vollkommenerere Exemplare finden, die beginnen, mehr der gleichen Art zu bauen, und schlechtere, die weniger oder keine "Nachkommenschaft" liefern und auf den Schrott wandern. Die zufällig gefundenen Vervollkommnungen werden in der Nachkommenschaft gefestigt, und im Laufe der Zeit vervollkommen sich die Maschinen durch die "natürliche" Auslese ohne Mitwirkung der Ingenieure, die das erste Muster geschaffen haben.

Bestimmt man jedoch die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten nützlicher und unnützer Merkmale, so werden die Hoffnungen von Neumanns zunichte.

Offenbar ist das Auftreten eines unnützen Merkmals viel wahrscheinlicher als das eines nützlichen. Ebenso ist es viel wahrscheinlicher, dass nützliche Merkmale durch zufällige Störungen bei der Konstruktion der "Nachkommen" verlorengehen, als das neue nützliche Merkmale dabei zufällig entstehen, solange nichts zur Erhaltung der gewonnenen Informationen getan wird. Die Lebewesen und die von Neumannschen Maschinen, die keine Mittel besitzen, um Fehler in dem Teil ihres Programms, der unbedingt nützlich ist und nicht geändert werden kann, zu beseitigen, müssen degenerieren.

Die einfachste Methode, einen Fehler zu beseitigen, ist der Vergleich mit einem offenkundig richtigen Prototyp, der Urquelle. Das ist den Archivaren, Historikern und Literaturwissenschaftlern, den Bewahrern des geschriebenen Erbes der Menschheit, bekannt. So kann der Konstrukteur der von Neumannschen Maschinen diese zwingen, von Zeit zu Zeit zur ersten Maschine - zur Ahnin - zurückzukehren und ihr (eventuell fehlerhaftes) Programm mit dem des Originals zu vergleichen.

Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass das Programm der von Neumannschen Maschine in Form von Löchern auf ein dünnes Stahlband geschrieben ist. Man kann eine einfache Einrichtung bauen, die das Originalband mit dem Kopieband vergleicht. Findet sie auf der Kopie z. B. eine unnötige Lochung, die im Original fehlt, so schweißt sie diese zu. Ist umgekehrt in der Kopie an einer Stelle kein Loch, wo im Original eins ist, so locht die Anlage die Kopie an dieser Stelle.

In der beschriebenen Einrichtung muss also eine Bevorzugung, eine größere Autorität der Lochungen des alten Bandes gegenüber denen des neuen vorgesehen sein, obwohl diese äußerlich völlig gleich sind.

Aber was tun, wenn kein Muster existiert, wenn es verlorengegangen ist? Wenn nämlich die erste von Menschen gebaute Maschine nicht besonders konserviert würde, so müsste sie sich wesentlich früher als ihre Nachkommen abnutzen. Die Maschine wird zu Schrott, zu Material für ihre eigenen Kopien. Damit ist aber die "Methode des Urmusters" hinfällig, und man muss raffiniertere Verfahren erfinden.

Man kann beispielsweise die Anzahl der Programmbänder in jeder Maschine verdoppeln oder gar verdreifachen und die Vergleichsoperation von der Maschine selbst vornehmen lassen. Natürlich kann die Aufzeichnung auf den Bändern nach wie vor beim Herstellen von Kopien verzerrt werden.

Aber der "blinde" Zufall, der die Maschine zuvor auf den Weg des Niederganges gedrängt hat, wird nun selbst zur Beschützerin der Ordnung. Denn wenn z. B. auf jedem Band im Durchschnitt zehn zufällige Fehler auf tausend Zeichen auftreten, so sind das fast sicher verschiedene Fehler, d. h. Fehler an verschiedenen Stellen der Bänder.

Würde ein Analphabet irgendein literarisches Werk vernichten wollen und zu diesem Zweck aus jedem Exemplar auf gut Glück einige Seiten herausreißen und verbrennen, so würde er alle Exemplare verderben. Mit hoher Wahrscheinlichkeit hätte er aber nicht das ganze Werk vernichtet. Aus den verbliebenen Blättern kann man nämlich höchst wahrscheinlich mindestens ein ganzes Exemplar zusammenstellen und dann wieder vervielfältigen.

Von den drei Zeichen, die bei den drei Bändern an einer Stelle stehen, ist also im allgemeinen nur eins verzerrt: diese Verzerrung kann man erstens feststellen und zweitens durch eine au-

tomatische Anlage korrigieren.

Damit ist das Programm weit stabiler gegenüber Störungen, obwohl eine gewisse Gefahr der gleichzeitigen Beschädigung von Zeichen an der gleichen Stelle natürlich bestehenbleibt und durch diese innere Kontrolle nicht beseitigt werden kann.

Führt man die Überlegungen weiter, so kann man neue Möglichkeiten zur Erhaltung der Information in den Programmen der "Neumannschen Maschinen" finden. Man kann ja die Programmbänder aller anderen Maschinen, die von einem Ausgangsmodell abstammen, ebenfalls als Kontrollduplikate ansehen. Sie werden nur an einem anderen Ort aufbewahrt!

Und wenn zwei, drei innere Duplikate des Programms einer Maschine nicht ausreichen, um ihre Nachkommen vor unerwünschten Verzerrungen zu schützen, so kann sie ja die Bänder benutzen, die sich in den Steuerzentren anderer Maschinen befinden!

Der nützliche Inhalt in ihnen ist der gleiche, nur die Fehler sind im allgemeinen andere. Dieser Umstand macht sie für die gegebene Maschine höchst wertvoll, wenn sich in den Bandduplikaten ihres Programmzentrums schon Fehler angesammelt haben, die auf allen Bändern gleich sind und daher durch die innere Kontrolle nicht beseitigt werden können.

Ein Konstrukteur, der die selbstreproduzierenden Maschinen vor einer "Degeneration" bewahren will, muss daher so vorgehen, dass die von Neumannsche Maschine die Möglichkeit hat, ihr Programm mit dem Programm irgendeiner gleichartigen Maschine zu vergleichen, bevor sie es an eine soeben hergestellte Maschine weitergibt.

Beide Maschinen können zwar die Unvollkommenheiten ihrer eigenen Konstruktion nicht mehr korrigieren, sie können aber die Organisation ihrer Nachkommen auf einem hinreichend hohen Niveau halten. Die Kontrolleinrichtung kann sich irren: sie kann nutzlos eigene mit den gleichen Fehlern behaftete Programmbänder vergleichen.

Dagegen wäre es nötig, eins von ihren Programmbändern mit einem fremden, mit anderen Fehlern behaftetes Band zu vergleichen. Es kann sein, dass sie nicht alle Fehler bei einem Vergleich korrigiert. Es kann auch geschehen, dass die Einzelsignale auf dem Band nicht binär sind, d. h., es besteht nicht mehr nur die Alternative "Loch - kein Loch", sondern es sind alle Übergänge zwischen einer glatten Bandstelle über mehr oder weniger tiefe Dellen, kleine Löcher bis zum voll ausgestanzten Loch möglich, wobei aber nur die glatte Bandstelle und das voll ausgestanzte Loch Information tragen, alle übrigen Signalwerte durch Störungen entstehen.

Der ersten Gefahr, der Beschränkung der Kontrolle allein auf innere Vergleiche, kann man leicht aus dem Wege gehen, indem man deutlich unterscheidbare Bandtypen einführt, beispielsweise schmale und breite Bänder, die in den Generationen der Maschinen völlig regellos aufeinander folgen. Dann könnte eine Maschine mit schmalen Bändern, nachdem sie eine gewisse Zeit die Programme im Innern überprüft hat, auf die Suche nach einem breiten Band gehen. Ein schmales Band könnte nämlich sowohl ein fremdes als auch ein eigenes sein, ein breites ist dagegen notwendig ein fremdes, wie es für die Kontrolle erforderlich ist.

Die Gefahr des Auftretens von unvollständigen Lochungen, von Einbeulungen usw. kann sogar zu einem Vorteil werden. Da der Übergang von einem Loch zu einer ebenen Stelle auf dem Band nicht in einem Schritt, durch einen Fehler erfolgt, ist der Konstrukteur berechtigt, sich auf nur zwei einander kontrollierende Bänder (an Stelle von drei oder mehr) zu beschränken. Wenn bei zwei gleichberechtigten Bändern ein Loch und eine glatte Stelle auftreten, so kann man nicht feststellen, welches Zeichen richtig und welches falsch ist. Zwischen einem Loch und einer Delle ist jedoch eine Entscheidung möglich.

Wir betrachten die von Neumannschen Maschinen hier nur dazu, um einige sehr allgemeine Gesetze zu veranschaulichen, die sich auf jede Form der Organisation, auf jede Regelmäßigkeit im Verhältnis zu Chaos und Regellosigkeit beziehen.

Diese Gesetze wirken bei der Lösung von Gleichungen durch elektronische Rechenmaschinen und bei der Neuausgabe von alten Chroniken, sie sind verbindlich für alle mechanischen, pneumatischen und elektronischen Einrichtungen, die Ingenieure in Steuerungssystemen benutzen. Den gleichen Gesetzen gehorcht die lebende Natur, die Muster einer sehr hohen Organisation zeigt, die erstaunlich stabil und beständig sind. Die Zellen und Organismen sind in ihren Grundzügen zweifellos den von Neumannschen Maschinen ein wenig ähnlich.

Die erste Leistung der wissenschaftlichen Biologie war die Feststellung der Tatsache, dass kein Lebewesen durch Urzeugung entstehen kann: sie alle stammen von ihnen ähnlichen Eltern ab. Den Stoff für die Gewebe und die Energie für die Bewegung entnehmen die Lebewesen aus ihrer Umwelt, aber in der Umwelt können sie nicht (jedenfalls nicht sofort) die Ordnung finden, die einen Hirsch von einem Schmetterling und Kohl von Pilzen unterscheidet, d. h. die Reihenfolge der Basen in der DNS, die der Reihe von Löchern und glatten Stellen auf den Bändern entspricht, ohne die sich auch die von Neumannschen Maschinen nicht vermehren können.

Ferner wurde bewiesen, dass alle höheren Organismen Systeme von Zellen sind, die durch die Teilung einer Zelle, der Eizelle, entstanden. Die einzelnen von Neumannschen Maschinen, die hier beschrieben wurden, werden nicht durch Teilung gebaut.

Aber man kann sich eine Gesamtheit von Maschinen vorstellen, eine große Maschinengemeinschaft aus den Nachkommen einer Maschine, zwischen denen eine Wechselwirkung und eine Arbeitsteilung besteht. Jedes Band kann nämlich in geordneter Folge sehr viele Programmbeschreibungen von Maschinenvarianten enthalten, die einander ergänzende, für die ganze Gemeinschaft nützliche Funktionen haben. Die Nachkommen der ersten Maschine sind dann etwa bis zum hundertsten Glied wesentlich voneinander verschieden und bilden eine Gemeinschaft, die einem mehrzelligen Organismus ähnlich ist.

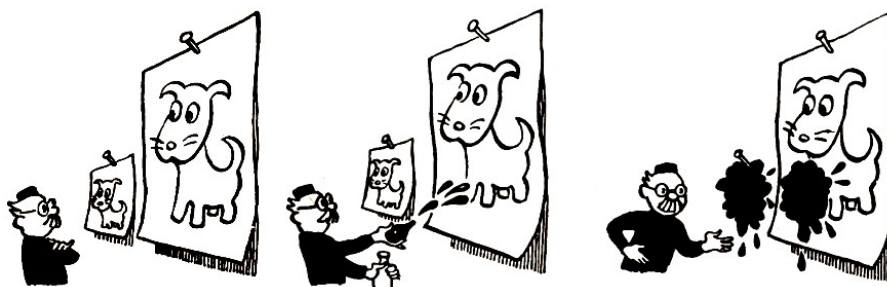


Bild 8.3.: Die Größe einer Informationsmenge ist nicht gleich der Anzahl der zu ihrer Übertragung nötigen Signale. Die große und die kleine Abbildung des Hundes tragen die gleiche Informationsmenge. Die Abbildung, die weniger Signale, d. h. Papier und Farbe, erforderte, ist gehaltvoller, aber dafür ist die andere, redundante Abbildung stabiler gegenüber Störungen. Sie ist, wie man sieht, fast völlig erhalten geblieben, als sie mit Tinte bespritzt wurde.

Danach wird das Programm von neuem abgewickelt, und ein neuer "Organismus" entsteht. Darüber hinaus können spezielle Vorrichtungen existieren, die das Programm zurückdrehen, wenn eine für die Gemeinschaft wichtige Variante nicht richtig konstruiert oder zerstört worden ist.

Mit solchen Vorrichtungen kann die Maschinengemeinschaft verlorengegangene Organe regenerieren und sogar eine neue Gemeinschaft aus einer einzelnen Maschine, aus einem Glied

reproduzieren.

Die gleichen Eigenschaften besitzen in verschiedenem Maße die mehrzelligen lebenden Organismen. Der deutsche vitalistische Biologe Hans Driesch nannte sie "harmonisch- und komplexäquipotentielle" Systeme.

Diese vielschichtige Bezeichnung führte Driesch speziell dazu ein, um zwischen lebenden Organismen und Maschinen eine unübersteigbare Schranke zu errichten.



Bild 8.4.: Wenn die innere Kontrolle der Zelle nicht ausreicht, so vereinigen sich die Einzeller entweder (oben) oder sie tauschen Teile der Kernmasse aus, die DNS enthalten. Bei Mehrzellern wird diese Kontrolle auf einem zuverlässigeren Wege verwirklicht und bedingt die Einteilung in Geschlechter.

Nach seiner Meinung können Maschinen nichts regenerieren und ihre Elemente nicht von einem Anfangselement abstammen. "Die Vorstellung einer solchen Art von Maschinen ist völlig unsinnig", behauptete Driesch.<sup>32</sup>

Man erhält jedoch keinen Unsinn. Im Gegenteil, die Kolonien der von Neumannschen Maschinen müssen notwendig alle die Merkmale haben, durch die sich mehrzellige lebende Organismen auszeichnen: die Entwicklung aus einer "Zelle", die Fähigkeit zur vegetativen Vermehrung aus Teilen, die Fähigkeit zur Regeneration verlorengegangener Teile. Und nicht nur das.

Wir erinnern an einige sehr wichtige Einzelheiten, die durch langjährige mikroskopische Beobachtungen lebender Zellen entdeckt wurden.

Wenn die steuernden Nukleinbildungen sichtbar werden, nennt man sie Chromosomen. Diese Chromosomen sind in allen Zellen doppelt vorhanden. Die Natur bewahrt "hartnäckig" in jeder Zelle zwei Programmsätze auf.

Von Zeit zu Zeit "empfinden" sogar einzeln lebende Organismen - Einzeller - das merkwürdige "Bedürfnis", einen Programmsatz mit einem ebensolchen Organismus zu tauschen. Manchmal vereinigen sie sich zu diesem Zweck, manchmal tauschen sie den Stoff der Zellkerne: man spricht von Kopulation und Konjugation.

Zuvor vollzieht sich eine besondere Teilung, die Haploidteilung, bei der zwei Zellen mit nur einem Programmsatz entstehen. Bei der Vereinigung zweier haploider Zellen entsteht wieder eine Zelle mit zwei Chromosomensätzen, bei deren normaler Teilung die Paarigkeit der Sätze erhalten bleibt.

Im Mikroskop kann man verfolgen, wie sich die beiden Sätze zu einem Paar ordnen und sich manchmal sogar verflechten.

Es ist nicht einmal ein Mikroskop nötig, um festzustellen, dass in der ganzen lebenden Natur, bei den Pflanzen, den Tieren und beim Menschen, eine Vereinigung zweier verschiedener Zellen mit unvollständigen einfachen Programmsätzen vor sich geht, ehe sich aus dem Ei ein neuer Organismus entwickelt. Zur Sicherung dieses Prozesses bildeten sich im Laufe der Entwicklung die Geschlechtsunterschiede zwischen den Organismen heraus, es entstanden Männchen und Weibchen.

Warum das geschieht, ist bekannt. Zum geeigneten Zeitpunkt erzeugen die Zellen und die mehrzelligen Organismen entsprechende chemische Regler, die Hormone, die die Funktion der Organe und sogar das Verhalten der Lebewesen beeinflussen. Aber wozu geschieht das?

---

<sup>32</sup>H. Driesch: Vitalismus, Moskau 1915, Seite 234.

Der Organismus bildet verschiedene regelnde Rückkopplungssysteme aus, intrazelluläre und interzelluläre.<sup>33</sup> Das Hauptsystem, die oberste Rückkopplung, die durch die Umwelt führt und die Sammlung von Information durch die biologische Art sichert, besitzt einen Speicher für Informationen, nämlich die Struktur der Nukleinsäuren.

Die Nukleinsäuren haben die Tendenz, auszuarten. Diese Tendenz ist allen Polymeren eigen, und es gibt dafür den sehr richtigen Fachausdruck "Altern der Polymere". Die Eiweiße altern, aber in den Ribosomen stanz die RNS neu. Die RNS altert, aber im Kern führt die DNS die Synthese neuer RNS durch. Würden die RNS und die Eiweiße sich selbst reproduzieren, so könnten sie dem schnellen Alterungsprozess nicht widerstehen.

Den Sammlern alter Münzen sind die Merkmale bekannt, mit deren Hilfe es manchmal gelingt, die Herkunft von Münzen festzustellen. Es sind das die Fehler, die kaum merklichen Ungenauigkeiten, die bei der Herstellung oder beim Gebrauch der Patrizen und Matrizen entstehen. Eine Patrizie ist ein erhabener Stempel, mit dem die Matrize geformt wird, und die Matrize ist ein Stempel zur Herstellung der Münzen. Ein Fehler eines Geldstücks ist diesem allein eigen. Ein Fehler einer Matrize wird auf alle Münzen übertragen, die mit ihr geprägt werden. Ein Fehler einer Patrizie erfährt die größte Verbreitung, da er auf alle Matrizen und durch diese auf alle Münzen übertragen wird.

Ein altes Gewebe und eine gealterte Zelle können von sich aus keine jüngere, frischere Generation liefern, weil die Nachkommen nicht nur die nützliche Information, sondern auch das ganze im Speicher gesammelte Rauschen erben. In der lebenden Natur zeugen jedoch relativ alte Eltern biologisch junge Nachkommen. Das ist nur durch jenen Kontrollvorgang möglich, den man in der Biologie als Befruchtung bezeichnet.

Was ging in den Hefezellen bei dem erwähnten Versuch von Roman und Jacob vor?

In jeder Spore war derselbe Chromosomenteil beschädigt, der für die Herstellung einer Aminosäure zuständig ist. Die Beschädigungen verteilten sich aber auf verschiedene Abschnitte dieses Teils, und als die Chromosomen zusammentrafen, stand jedem beschädigten Abschnitt ein unbeschädigter gegenüber.

Die leichte ultraviolette Strahlung verschlechterte und verbesserte nichts: Die Strahlen erzeugten nur eine größere Ionenzahl, und durch den Austausch von Ionen konnten die Chromosomen ihre frühere Struktur nach dem unbeschädigten Muster, dem Abschnitt des anderen Chromosomen, wiederherstellen.

"Die Bestrahlung hilft der Zelle gewissermaßen, auf der Grundlage einzelner Teile zweier beschädigter Allele eine normale Kopie des Gens anzufertigen", bemerkte dazu K. Tobajs.<sup>34</sup> Auf die gleiche Weise kontrollieren einander offenbar auch die sich bei der Befruchtung vereinigenden Chromosomen, und daher sind die CD Kinder jünger als ihre Eltern.

Das alles haben wir schon bei den hypothetischen von Neumannschen Maschinen beobachtet. An Stelle der Chromosomenpaare traten dort gedoppelte Programmbänder auf, an Stelle der geschlechtlichen Unterschiede breite und schmale Bänder, und die Vereinigung fremdartiger Zellen ist der Vereinigung der Programmzentren zweier Maschinen zur Kontrolle der Programme vor ihrer Übergabe an eine neue Maschine analog.

---

<sup>33</sup>interzellulär - zwischen den Zellen gelegen; intrazellulär - innerhalb der Zellen gelegen.

<sup>34</sup>Moderne Probleme der Biophysik.

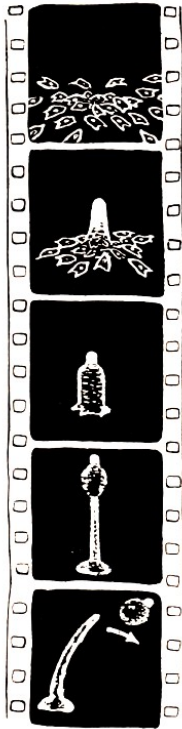


Bild 8.5.: Die Myxomyzeten schaffen bei der Bildung der Sporen vorübergehend einen "mehrzelligen Organismus", um Kreuzungen zwischen nahen Verwandten zu vermeiden.

Das überzeugt uns nicht nur davon, dass die "maschinelle" Modellierung der Eigenschaften lebender Organismen möglich ist, sondern hauptsächlich davon, dass diese Modellierung die Rolle dieser Eigenschaften für die Lebensprozesse, die Sammlung und Erhaltung der intrazellulären Information, die Erhaltung der Art klären wird.

Die mehrzelligen Organismen entstanden offenbar, als der Austausch von Chromosomen zwischen einander räumlich nahen einzelligen Verwandten für die Beseitigung von Fehlern nicht mehr ausreichte. So bilden die einzelligen Kugelalgen *Volvox* periodisch eine Kugelkolonie, die sich nach Abtrennung der Zellen, die für die Vermehrung bestimmt sind, von diesen so weit als möglich entfernt. Zu dieser Zeit entstehen in der Kolonie spezialisierte lichtempfindliche Zellen, die helfen, die ungeordnete Bewegung der Kugelalgen zu koordinieren und eine gerichtete Bewegung der ganzen Kolonie zu erreichen.

Bei den einzelligen Myxomyzeten stellt das Wegschleudern eine komplizierte Operation dar, die damit beginnt, dass die einzeln lebenden Zellen zusammenkleben und eine Art Turm bilden. Die Zellen, die für die Vermehrung bestimmt sind, bilden am Fuß des Turms eine Kugel, die dann langsam zur Spitze hinaufkriecht und von dort aus seitlich weggestoßen wird. Ist diese Operation ausgeführt, so zerfällt das mehrzellige System wieder in einzelne Zellen.

Je höher die Organisation eines Lebewesens ist, desto weniger redundant ist seine Vererbungsinformation kodiert, desto wichtiger ist die Kontrolle. Die vegetativen Formen der Vermehrung werden bei den komplizierteren Organismen immer seltener und verschwinden, es dominieren die Kreuzungsformen.

Natürlich hatten die Biologen längst die überaus zahlreichen Vorkehrungen bemerkt, die Pflanzen und Tiere treffen, nur um die Vereinigung einer ihrer Zellen mit einer fremden zu erreichen; bevor der Anfang zu einem neuen Organismus gemacht wird. Es lag der Gedanke nahe, die Hauptsache in diesem Prozess sei irgendein Unterschied zwischen den Geschlechtszellen. Zuerst vermutete man, dass der Ursprung nur in einer der Zellen liegt, und man stritt lange, in welcher, in der männlichen oder in der weiblichen. Aristoteles gab der männlichen den Vorzug.

Dann meinte man, in jeder Zelle seien für die Entwicklung des neuen Organismus notwendige Stoffe, die die andere Zelle nicht besitzt. Auch das war unbegreiflich: warum kann sich die eine Zelle diesen Stoff nicht verschaffen, wie das die andere tut, die ihr der Herkunft nach sehr nahe ist?

Heute wird unter den Biologen ein heftiger Streit geführt, in dem Meinungsverschiedenheiten über die Befruchtung mit fremdem Blütenstaub oder Spermien eine große Rolle spielen.<sup>35</sup>

<sup>35</sup>Da die "maschinelle" Modellierung erst mit der Verbreitung der Kybernetik ernsthaft zur Lösung biologischer Probleme angewandt wurde, sind die hier dargelegten Gedanken den Biologen noch fast unbekannt. Akademiemitglied I. I. Schmalhausen zum Beispiel schreibt zwar dem doppelten Chromosomensatz Kontrollfunktionen zu, dehnt diese aber nicht auf die Befruchtung aus. Siehe I. I. Schmalhausen: Grundlagen des Evolutionsprozesses vom kybernetischen Standpunkt in "Probleme der Kybernetik". Bd. 4, Akademie-Verlag, Berlin 1964.

Schon lange kennen die Pflanzenzüchter Möglichkeiten, der Pflanze eine der beiden Vermehrungsmöglichkeiten aufzuzwingen; nämlich die sogenannte ungeschlechtliche Vermehrung durch Ableger und Pfropfreiser, wobei keine Befruchtung stattfindet, oder die geschlechtliche Vermehrung durch Bestäubung der Blüten, womöglich mit "fremdem" Blütenstaub.

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Lebensfähigkeit der Organismen bei einer Vermehrung ohne Bestäubung mit fremdem Blütenstaub allmählich verringert. Daher haben einige Biologen die kreuzende Befruchtung vollkommen zu Recht mit der Erhöhung der Lebensfähigkeit in Zusammenhang gebracht.

Traditionsgemäß sehen sie aber als Ursache dieses Effekts die verschiedenen Eigenschaften der beiden sich vereinigenden Zellen an, die ihrer Meinung nach daher rühren, dass die Eltern, die Quellen dieser Zellen, verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren. Das ist aber nicht überzeugend; Pflanzen und Tiere beider Geschlechter leben unter völlig gleichen Bedingungen. Nach der Meinung anderer besteht der Nutzen der kreuzenden Befruchtung in der Vermischung, in der Kombination verschiedener Eigenschaften der Vorfahren in den Nachkommen. So entstehen verschiedene Nachkommen, und durch die natürliche Selektion bleiben die besten Kombinationen der Eigenschaften erhalten, die schlechtesten werden ausgelesen.

Daraus folgt die Existenz besonderer "Vererbungsatome", der Gene, die sehr beständig sind und ständig vermischt werden, die teilweise in verhüllter Form übertragen werden und dann plötzlich in der Nachkommenschaft wieder auftauchen.

Tatsächlich gelang es in Übereinstimmung mit den Voraussagen der Theorie eine Vermischung von Merkmalen zu beobachten. Aber welche waren das?

Die Farben von Blütenblättern, Haaren und Augen, gewisse Missbildungen, mit einem Wort, entweder unwichtige, für das Überleben der Art unwesentliche oder schädliche Merkmale. Es zeigte sich stets, dass die hauptsächlichsten, die für das Leben wesentlichen Eigenschaften bei beiden Eltern vorhanden sind und dass bei ihnen keine Vermischung stattfindet.

Darüber hinaus zeigt die Erfahrung: Verhindert man die kreuzende Befruchtung, so werden die Nachkommen keine genauen Kopien der Eltern, sondern es treten weit mehr Abweichungen von dem Durchschnittstyp auf, mehr verschiedenartige neue Merkmale, mehr Material für die Selektion.

Einerseits wurde festgestellt, dass die Lebewesen ihre Vererbungsapparate sorgfältig vor äußeren Einwirkungen schützen und keineswegs danach streben, Mutationen zu liefern, damit sich die natürliche Selektion in vollem Glanz zeigen kann. Andererseits nehmen sie aus irgendeinem Grund Zuflucht zur kreuzenden Befruchtung und schaffen Unordnung in den Merkmalen ihrer Nachkommen.

Völlig natürlich ist das erste: Mutationen sind in der Regel schädlich, und leicht mutierende Organismen müssten längst ausgestorben sein. Völlig unverständlich ist das zweite: Ein einmal entstandener und den Umweltbedingungen gut angepasster Typ von Lebewesen gewinnt nichts durch die Selektion, er könnte ausgezeichnet existieren, wenn seine Nachkommen nur exakt die Formen der Vorfahren wiederholen würden.

Verliefe die Entwicklung in die Richtung, die aus den alten Vorstellungen folgt, so müssten wir in der Physiologie der Organismen und in den Instinkten der Tiere das Streben zur Zusammenstellung möglichst unähnlicher Elternpaare beobachten. Das ist aber nicht der Fall. Es werden gesunde, widerstandsfähige, starke, lebhaft gefärbte, aber sich nicht wesentlich unterscheidende Eltern zusammengeführt.

Die beiden entgegengesetzten Standpunkte der Biologen bezüglich der Befruchtung stimmen



in einem überein: Wichtig sind die Unterschiede. Und gerade das ist falsch. Nicht der Unterschied, sondern die Ähnlichkeit der sich vereinigenden Elternzellen ist wichtig, wichtig ist das gemeinsame, was die vorliegende Art von den anderen unterscheidet, jener Schatz an Information, der mit der bitteren Erfahrung von Myriaden von Vorfahren bezahlt wurde und den die Art vor der zerstörenden Kraft des blinden Zufalls bewahren muss.

Die Vererbungsprogramme der lebenden Zellen werden also einer Kontrolle unterworfen, und diese wird auf zweifache Weise ausgeführt. Erstens werden in jeder Zelle zwei Exemplare der Programme aufbewahrt, und der Austausch von Ionen zwischen den orientierten Molekülen ermöglicht es ihnen, ihre Struktur bei zufälligen Verletzungen wiederherzustellen. Gehen jedoch die Stabilitätsreserven in diesem System zur Neige, so strebt der Organismus danach, einen einfachen Programmsatz aus einem anderen Organismus zu erwerben und kontrolliert mit ihm seine Programme.

Ein Einzeller tut das periodisch, ein Mehrzeller in dem Moment, der dem Anfang der Ausführung des Programms vorausgeht, nämlich bei der Befruchtung.

Das Altern der Einzeller wird nicht durch den Tod beendet: Jeder Einzeller kann sich regenerieren. Das Altern der Mehrzeller besteht im Sammeln von nicht mehr zu beseitigenden Fehlern in den Programmen. Die Zellen in den Geweben sind von den nächsten Verwandten umgeben, und der Austausch von Kernmasse zwischen diesen kann zu nichts führen: Die Fehler sind die gleichen.

Die Struktur der Nukleinsäuren artet aus, ein Rückgängigmachen ist unmöglich, und die Folge ist eine Zerrüttung der Eiweißsynthese, eine Störung des Stoff- und Energieaustausches und der Zerfall des Steuerungssystems des Organismus. Nur beim Entstehen eines neuen Organismus wird die Struktur der DNS in einer einzigen Zelle, der Zygote, regeneriert.

So löst die Kybernetik ein altes Rätsel, über das schon Lukrez nachdachte:<sup>36</sup>

Über das, sollte die Zeit, was Alters halber sie wegnimmt,  
Völlig vernichten und ganz und gar aufzehren den Urstoff:  
Woher brächte dann wieder die Gattungen lebender Wesen  
Venus ans Licht, woher ernährete Dädalus Erde  
Was sie hervorgebracht, und reicht ihm Futter zum Wachstum?

Es werden die Gründe für die längst festgestellte negative Wirkung der Selbstbestäubung und der Kreuzung zwischen nahen Verwandten klar: Die Kontrolle ist unvollkommen, die Fehler bleiben teilweise erhalten.

Einen glänzenden Beweis für die Kontrollfunktion des Geschlechts liefert die Entwicklung unbefruchteter Gameten (Sporen). Eine solche Entwicklung finden wir in der Natur bei gewissen Moosen, aber auch bei Insekten, z. B. den Blattläusen und den Bienenmännchen, den Drohnen. Im Jahre 1886 bewies der russische Gelehrte A. Tichomirow durch Versuche, dass die Entwicklung aus Gameten sogar bei solchen Tieren möglich ist, die sich selbst nie so reproduziert haben. Zu diesem Zweck muss man den Gameten erwärmen oder in anderer Weise auf ihn einwirken.

Heute wissen wir, dass ein halber Chromosomensatz zur Spaltung und zur Regeneration fähig ist und folglich einen doppelten Chromosomensatz bilden und den Lebenszyklus eines neuen Organismus beginnen kann. Durch die Einwirkung der Temperatur auf unbefruchtete Eier des Seidenspinners erreichte Tichomirow diese Aufspaltung, und aus den Gameten bildeten sich

---

<sup>36</sup>T. Lucretius Carus: Von der Natur der Dinge. Deutsch in der Versweise der Urschrift von W. Binder. Erstes Buch, Vers 225 bis 228.

mehrzellige Organismen.

Die Befruchtung hat zweierlei Auswirkungen. Erstens wird das Programm in Bewegung gesetzt, zweitens wird es kontrolliert. Man kann das Programm künstlich ohne Teilnahme einer Geschlechtszelle eines anderen Elternteils in Bewegung setzen.

Keine "qualitative Verschiedenheit", die für die Entwicklung angeblich so notwendig ist, wird in das Ei hineingetragen, und doch erfolgt die Entwicklung, wenn auch missgestaltete oder schwache Exemplare entstehen. Aus der klassischen Theorie folgt diese Schwächung nicht: Der Organismus trägt nur Gene von einem Elternteil und müsste ebenso lebensfähig sein wie dieser. Nur die Vorstellung von der Kontrollfunktion erklärt den Ausgang des Experiments: Der Organismus ist schon von Geburt an alt, die Fehler sind nicht korrigiert worden und kommen in Abweichungen von dem gewöhnlichen Typ zum Ausdruck.

Die experimentelle Technik der Embryologen entwickelt sich rasch. Vor kurzem führte der italienische Professor D. Petrucci die künstliche Befruchtung eines menschlichen Eis erfolgreich durch, und er hielt die Entwicklung des Embryos in einem Kolben fast zwei Monate lang aufrecht.

Bei geeigneter Zusammenstellung der Fermente wird es, wie es scheint, in Zukunft gelingen, die "unbefleckte Empfängnis" mit der menschlichen Eizelle und sogar mit dem Spermatozoid zu verwirklichen. Aber dabei wird sich kein "Gottmensch" entwickeln, wie es die Legende von Christus erzählt, sondern eine lebensunfähige, altersschwache Missgeburt.

Wäre es möglich, in einen mehrzelligen Organismus DNS der gleichen Art einzuführen und sie bis zu den Kernen zu bringen, so würde der Organismus zwar nicht völlig unsterblich, seine Lebensdauer würde sich aber vervielfachen. Es stehen dem Fermente im Wege, die alle Nukleinsäuren, außer denen, die in den Kernen des gegebenen Organismus wirken, zerlegen.

Aber schon heute kann man sich experimentell geschaffene wandernde Kerne vorstellen, die gegen die Wirkung der Nuklease geschützt sind und die Wiederherstellung der Information in jeder Zelle des Organismus bewirken. Sie müssen gewöhnlichen Viren sehr ähnlich sein. Der Virus der Unsterblichkeit!

Dieser Ausdruck könnte selbst in einem utopischen Roman gewagt erscheinen. Er stellt jedoch einfach eine Kombination von fünf Programmen dar, die alle bereits in der Natur existieren.

Das erste Programm muss schützende Eiweiße herstellen, wie das alle Viren tun, das zweite muss zur richtigen Zeit Fermente liefern, die das Eindringen der Nukleinsäuren in den Kern ermöglichen. Solche Fermente stellt das Spermatozoid her.

Das dritte Programm muss eine Haploidteilung des Kerns ohne Teilung der Zelle hervorrufen, d. h. eine Teilung, bei der in jedem Kern ein halber Chromosomensatz bleibt. Beim Reifen der Geschlechtszellen geschieht das, und es ist natürlich möglich, herauszufinden, welche Fermente diesen Prozess regeln.

Das vierte Programm muss die Zurückbildung von einem der beiden Haploidkerne hervorrufen. Das fünfte Programm bewirkt die Vereinigung des anderen Kerns mit dem "Virus der Unsterblichkeit" zu einem normalen Zellkern.

Natürlich leugnet dieses phantastische Bild der "persönlichen Unsterblichkeit" nicht den Prozess des Alterns, der notwendig aus der Dynamik des Lebens selbst folgt. Es handelt sich nur um eine "Nukleotherapie" der Altersrückschritte, die auch auf spezielle Fälle der Zerrüttung der Funktionen der Gewebe und Organe angewendet werden kann. Auf dem Kongress über Krebsbekämpfung 1962 in Moskau wurde unter anderem berichtet, dass Nukleinsäuren aus

gesunden Geweben auf bösartige Geschwülste eine unterdrückende Wirkung haben.

Der Verstand des Menschen hebt die Wirkungen der Naturgesetze nicht auf, auch nicht die Wirkung derjenigen, die uns altern und sterben lassen. Aber gewöhnlich findet er die Möglichkeit, diese Gesetze zum Wohl der Menschen auszunutzen. Und es besteht kein Zweifel, dass es die genaue Kenntnis der Grundlagen des Lebensprozesses ermöglichen wird, jede Unvollkommenheit des menschlichen Körpers - jener Grundlage unseres Verstandes, mit der uns die Schöpferkraft der Natur ausgezeichnet hat - zu korrigieren.

Die Kontrolle und die Erhaltung der Information gehören zu den Eigenschaften einer Rückkopplung. Wie in einem gewöhnlichen Regelsystem, das die Nichtübereinstimmung zwischen dem, was vorgeschrieben ist, und dem, was tatsächlich vorliegt, beseitigt, kann in einem Kontrollsystem nicht mehr Information auftreten, als in ihm steckt, da das System abgeschlossen ist.

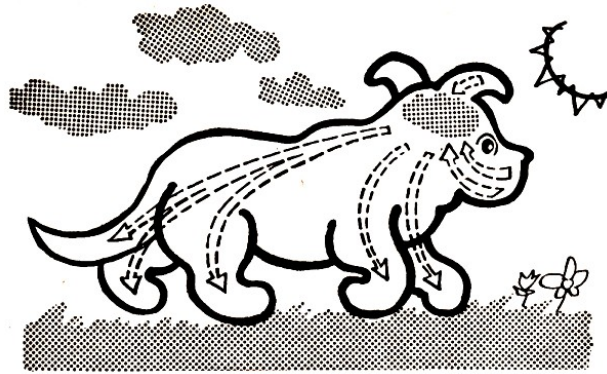
Das einzige Mittel, ein höheres Organisationsniveau zu erlangen, bleibt die Auslese von Kombinationen, die von dem Rauschen geliefert werden: in der lebenden Natur beruht dieses Mittel auf dem von Darwin entdeckten Prinzip der natürlichen Selektion.

Aber die Darwinsche Selektion ist nur unter bestimmten Bedingungen wirksam. Sie kann nicht in unkontrollierbaren Systemen wirken, in denen die seltenen nützlichen Änderungen von der Masse der schädlichen erdrückt werden. Sie wirkt auch nicht in vollständig kontrollierten Systemen: in denen jede Änderung durch ein Kontrollsystem beseitigt wird.

Mit wachsender Komplizierung und Vervollkommnung der Lebewesen wird die Festigung und Erhaltung des erreichten Organisationsniveaus zu einer immer wichtigeren Seite der Lebensprozesse. Immer weiter wird die Feder angespannt, immer schwächer werden die Schwingungen des Schwungrads, und immer verantwortlicher wird die Rolle der Sperrklinke, die ihm ermöglicht, sich in einer Richtung zu drehen.

Die Aufgabe dieser Sperrklinke erfüllt das System der Kontrollrückkopplungen im Organismus und in der Art. Es hält das früher erreichte Entwicklungsniveau aufrecht und schränkt das Durchprobieren der unendlich vielen Möglichkeiten bei der natürlichen Selektion ein.

## 9 Verhalten, eine neue Art der Anpassung



Von der Vervollkommnung des Körpers zur Vollkommenheit des Verhaltens - Reizbarkeit als nichtlineare Reaktion - Das Verhalten der Zellen - Mathematische und elektrische Modelle des zweckmäßigen Verhaltens - Psychologie der Einzeller - Die Entstehung der Sinnesorgane - Die Kodes, die im Nervensystem angewandt werden - Der Fisch-Kreisel - Wo endet der Instinkt und wo beginnt die Erfahrung? - Mathematische und elektrische Modelle der Erfahrung - Kybernetik und Psychologie.

Das Zusammenspiel von Mutation und Auslese der am besten an die Umwelt angepassten Lebewesen ist, wie die Geschichte der organischen Welt zeigt, eine erstaunlich zugkräftige Methode zur Erzeugung sehr vieler Arten von Lebewesen. Auf den höchsten Eisgipfeln, wo das Leben unter Sauerstoffmangel und niedrigen Temperaturen abläuft, in den Tiefen der Ozeane, in denen ewiges Dunkel und ungeheurer Druck herrschen, in den heißen feuchten Urwäldern der Tropen - überall gibt es einander sehr wenig ähnliche Nachkommen der ersten lebenden Polymere, Pflanzen und Tiere, die ihrer Umwelt ausgezeichnet angepasst sind und ihre Art fortpflanzen.

Aus der Sicht des Menschen ist die natürliche Auslese ein schreckliches System. Sie berücksichtigt weder die inneren Bedürfnisse eines leidenden Organismus noch die äußeren Ursachen seiner Leiden oder Freuden. Mit der Mitleidlosigkeit eines Tyrannen macht sie ihre Versuche und zahlt dafür mit Millionen von Lebewesen.

Wir, die Menschen, sind aus diesem grausamen Spiel als Sieger hervorgegangen. In den Krankenbetten, in denen der menschliche Organismus den Kampf gegen Viren und Bakterien aufnimmt, wird nicht die natürliche und erbliche Anpassungsfähigkeit des Organismus, sondern der Eingriff der medizinischen Wissenschaft und Technik zur Hauptkraft.

Unter unvollkommenen gesellschaftlichen Verhältnissen, in sozial zurückgebliebenen Ländern, in denen die Bevölkerung Hunger, Kriegen oder Verbrechen ausgesetzt ist, siegt manchmal nicht der physisch Stärkste, sondern der Geriebene, Grausame und Ehrlose.

Einige ängstliche Menschen fürchteten, dass die Menschheit mit der Aufhebung der natürlichen Selektion aufhören würde, sich zu entwickeln und zu vervollkommen, dass sie unter dem Einfluss des Entropiesatzes degenerieren würde. Das ist jedoch nicht geschehen. Die Sammlung von Information wird in wachsendem Tempo fortgesetzt, und ein Ende ist nicht abzusehen.

An die Stelle der Vervollkommnung der Struktur des menschlichen Körpers trat jedoch eine Vervollkommnung seines Verhaltens.

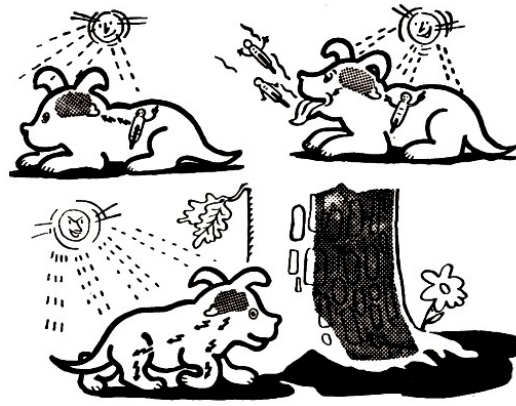


Bild 9.1.: Die inneren Rezeptoren eines Tieres zeigen an, dass der Organismus zu warm wird. Durch das Nervensystem werden Abkühlungsvorrichtungen in Gang gesetzt.

Hilft das nicht, so handelt das Tier.

Zweckmäßiges Verhalten liegt dann vor, wenn aus der riesigen Anzahl der Kombinationen von Handlungen, die einem gegebenen Organismus möglich sind, solche ausgewählt und durchgeführt werden, die seine Erhaltung und die Fortpflanzung der Art sichern.

Unter diesen Kombinationen gibt es solche, die mehr oder weniger wahrscheinlich sind; nach der bekannten Formel von Shannon kann man - im Prinzip - die Informationsmenge berechnen, die in einer beliebigen Verhaltensweise liegt.

Die Entwicklung einer zweckmäßigen Verhaltensweise bei Einzellern beginnt mit einer erhöhten Reaktionsbereitschaft der Zellen auf äußere Einwirkungen. Die äußeren Einflüsse geben gewissermaßen den Anstoß zum automatischen Ablauf einer Reaktion, nämlich einer Änderung der inneren Ionenverteilung. Zunächst verstärkt sich der Umbauprozess.

Seine Ergebnisse regen den Umbau an, es vollzieht sich eine Art Explosion: hat die neue Ionenstruktur - die Verteilung geladener Teilchen - eine bestimmte Grenze erreicht, so wirkt sie negativ auf den Ablauf der Reaktion ein, die Ergebnisse des weiteren Umbaus dämpfen die Bewegung der Ionen, bis sich das ganze System schließlich wieder im Gleichgewicht befindet.

Diese komplizierte gegenseitige Beeinflussung der Ionen bildet die Grundlage für die Reizbarkeit einer Zelle. Eine Reizung stellt also den einfachsten Fall der Steuerung des Zustands der Zelle durch äußere Einwirkungen dar. A. Oparin definiert die Reizbarkeit als Eigenschaft jener Objekte, bei denen die "Reaktion der Stärke, dem Ort und der Art nach nicht der Stärke, dem Ort und der Art der Einwirkung entspricht".

Im Jahre 1939 zeigte der Physiker Barton, dass man die Reizung einer Zelle in einem ziemlich einfachen hydrodynamischen Modell nur unwesentlich vergrößert nachbilden kann. Das Modell besteht aus Gefäßen und Röhren, durch die ständig Wasser fließt. In den Gefäßen wird ein dynamisches Gleichgewicht hergestellt. Wird dieses Gleichgewicht durch irgendeinen fremden Tropfen gestört, so erhöht oder erniedrigt das nicht einfach den Wasserspiegel, sondern ruft einen starken Sprung des Wasserspiegels und allmählich abklingende Schwingungen hervor.

Ähnliches kann man bei der Wirkung elektrischer Signale auf das dynamische Gleichgewicht der Elektronenströme in Röhren- und Halbleitergeräten beobachten.

In der Elektrotechnik zum Beispiel hält man den Heizstrom einer Röhrenkathode dadurch konstant, dass man einen Kaltleiter verwendet, einen Eisenwasserstoffwiderstand. Dieser besteht aus einem feinen Eisendraht, der sich in einem mit Wasserstoff gefüllten Glaskolben befindet. Vergrößert man die Spannung an den Enden des Kaltleiters, so wächst in diesem die Stromstärke, und der Draht erwärmt sich. Der erwärmte Draht hat aber einen größeren Widerstand

als der nicht erwärmt, die Stromstärke in ihm verringert sich. In gewissen Grenzen wirkt sich daher eine Änderung der Spannung auf die Stromstärke nur unwesentlich aus, diese bleibt praktisch konstant, und das widerspricht deutlich dem Ohmschen Gesetz.

Eine Einrichtung wie den Kaltleiter bezeichnet man als "nichtlineares" Glied des Systems. Diese Nichtlinearität, d.h. die Ungültigkeit der üblichen quantitativen Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, spiegelt sich im Verhalten des Systems wider. (Die graphische Darstellung des funktionalen Zusammenhanges zwischen der Reaktion [z.B. der Stromstärke] und der Einwirkung [z. B. der Spannung] stellt in einem gewöhnlichen, kartesischen Koordinatensystem ein liegendes „s“ dar.)

Es ist gelungen, Modelle der Zelle zu schaffen - die unten beschriebenen Solionen -, bei denen die bei einer Reizung ablaufenden Prozesse von der gleichen physikalischen Art sind wie sie in der lebenden Zelle vor sich gehen, nämlich Ionenprozesse.

Bei der Reizung einer lebenden Zelle sind zwei Etappen zu beobachten: Erregung und Hemmung. Nach der Definition der Reizbarkeit entspricht die Reaktion auf eine Reizung nicht vollkommen ihren physikalischen Eigenschaften (Stärke, Ort, Art), d. h., die Reizung hat den Charakter eines Signals, das die Zelle aus ihrer Umwelt empfängt. Dieses Signal verändert, indem es die Zelle reizt, den Zustand der Zelle, wirkt also wie ein Befehl für eine Zustandsänderung, z. B. "zusammenziehen" oder "nicht zusammenziehen".

Welche Entwicklungsmöglichkeiten bestehen für einen Organismus, der solcherart reizbar ist?

Einerseits hätte er einen Vorteil davon, wenn seine äußeren Teile sich verhärten. Andererseits würde ein Panzer ihm die Möglichkeit nehmen, Signale von außen zu empfangen. Die Selektion hat aber schon seine Fähigkeit gefestigt, auf Signale, die Nahrung oder Gefahr anzeigen, durch Kontraktionen zu antworten, durch die sich der Organismus zur Signalquelle hin oder in entgegengesetzter Richtung bewegt.

Diese Reaktion, die den Anfang eines neuen operativen Signalsystems bildet, bezeichnet man im Unterschied zu der alten konservativen Vererbung als Taxis.

Die Taxis ist eine ganzheitliche Reaktion des Organismus auf Einwirkungen aus der Umwelt; im Organismus besteht kein Signalsystem, aber er verhält sich als Ganzes wie ein einfaches Signalsystem, das im Rahmen seiner Bewegungsfreiheit von außen gesteuert wird.

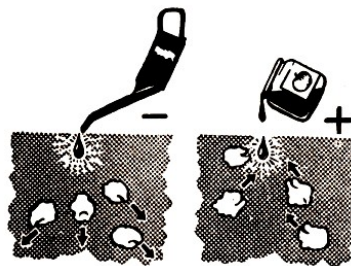


Bild 9.2.: Die Taxis der Einzeller ermöglicht ihnen, schädlichen Stoffen auszuweichen (links) und Nahrung zu finden (rechts).

Der Schöpfer zahlreicher physikalisch-chemischer Modelle von Einzellern, Rumbler, versuchte 1899 eine Art der Taxis, die Chemotaxis, die Reaktion auf die Anwesenheit chemischer Stoffe, nachzubilden. Er gab in eine Alkohollösung Tropfen von Rizinusöl und tauchte in der Nähe ein offenes Reagenzglas mit Öl oder Chloroform in die Lösung ein. Die Stoffe waren gefärbt, um die Beobachtung zu erleichtern.

Rumbler sah, wie die Tropfen energisch zu dem Reagenzglas strebten. Natürlich war für den

Versuch eine sehr große Konzentration des Köderstoffes erforderlich, denn die Tröpfchenmodelle leben trotz allem nicht; ihre Handlungen werden nicht durch die Existenz des Köders gesteuert, sondern durch die bei seiner Anwesenheit in der Lösung auftretenden physikalischen Kräfte hervorgerufen.

Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass Lebewesen - Pflanzen und Tiere - auf Licht, Feuchtigkeit und die Richtung der Schwerkraft reagieren.

Wie der polnische Biologe Dembowskij bemerkte, werden einige Reaktionen bei Einzellern, Hohltieren, Würmern, Krebsen, Spinnen und Insekten "so gesetzmäßig durchgeführt, dass der lebende Organismus fast mit dem Zeiger eines Kompasses in einem Magnetfeld zu vergleichen ist. Schickt man durch eine Röhre mit Infusorien einen elektrischen Strom, so wandern alle Infusorien zur Kathode.

Bei einer Änderung der Stromrichtung wandern die Infusorien, die sich um die Kathode gesammelt hatten, zum anderen Ende der Röhre, d. h. zur neuen Kathode. In dieser Weise kann man die Infusorien stundenlang hin und her treiben, und jedesmal ist ihre Reaktion gleich schnell und fehlerfrei."<sup>37</sup>

Das Verhalten der Infusorien im elektrischen Feld ist aber nicht für Lebewesen, ja nicht einmal für Automaten charakteristisch. Von einer automatischen Steuerung sprechen wir dann, wenn eine Nachricht, ein Signal, zu einem Befehl umgearbeitet wird, wobei Signal und Befehl durch das Kriterium der Zweckmäßigkeit verbunden sind: nur wenn es für die Infusorien vorteilhaft ist, zur Kathode zu schwimmen und sich von der Anode zu entfernen, ist diese Tätigkeit sinnvoll. Infusorien leben gewöhnlich nicht an Orten, an denen ein starker elektrischer Strom fließt. Ihre Bewegung zur Kathode ist erzwungen. Um eine erzwungene Bewegung handelt es sich z. B. auch in dem Falle, wenn wir ein Tier, das an ein Seil gebunden ist, steuern, indem wir am Seil ziehen. Im ersten Falle rührt die erzwungene Bewegung daher, dass der Strom die Ionenverteilung der Zelle beeinflusst, die auf einen solchen Einfluss nicht eingerichtet ist.

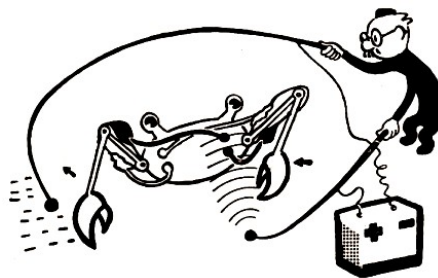


Bild 9.3.: Die Krabbe geht unfreiwillig zur Elektrode. Aber diese Bewegungen ermöglichen es, die elektrische Aktivität ihrer Nervenzellen zu untersuchen.

Mit der Komplizierung der Verhaltensweisen wird es immer schwieriger, Klarheit über ihre Beweggründe zu gewinnen. Wir halten es für klar, dass ein Stein weder Freude noch Leid oder sonst etwas empfindet, wenn er auf die Erde fällt. Freut sich aber ein Infusorium, wenn es Nahrung erreicht? Wie soll man sein Verhalten und seine Triebkräfte beschreiben?

Eine ausführliche Beschreibung aller physikalischen Prozesse, die in den Zellen eines Organismus vor sich gehen, wenn er gewissen Bedingungen ausgesetzt ist und auf diese durch ein bestimmtes Verhalten reagiert, wäre die beste Methode. Von ihrer Verwirklichung und um so mehr von ihrer experimentellen Prüfung sind wir aber weit entfernt.

Anders verhält es sich mit der mathematischen Beschreibung und dem Experiment an einem

<sup>37</sup>J. Dembowski: Psychologie der Tiere, Moskau 1959

kybernetischen Gerät. Eine solche Beschreibung enthält eine hinreichend vollständige Information, und Experimente ermöglichen es, diese in gewisser Weise zu ergänzen. Insbesondere kann festgestellt werden, inwieweit das Gerät den behandelten Sachverhalt richtig modelliert.

Die Kybernetik liefert zwei gute Verfahren, die den Übergang von den subjektiven Begriffen "wollen", "freuen", "beleidigt sein" zur Mathematik ermöglichen.

Erstens enthält jede Triebkraft und jede Verhaltensweise Informationen, und wir wissen, dass man diese Informationen durch Kodewörter ausdrücken kann, z. B. Folgen von Nullen und Einsen. Zweitens kann man jede Folge von Ziffern als Zahl auffassen, als Nummer einer der möglichen Verhaltensweisen.

Wir zeichnen zwei zueinander senkrechte Geraden und fassen sie als Zahlengeraden auf; jede Zahl kann man durch einen Punkt der Zahlengeraden darstellen. Auf der waagerechten Achse tragen wir die Nummern von Verhaltensweisen oder Befehlen ab, auf der vertikalen die Nummern der Situationen oder Nachrichten. Dann entspricht jedem Punkt des Gebiets zwischen den Achsen ein geordnetes Paar von Situation und Verhaltensweise. Wir nennen dieses Gebiet das Verhaltensfeld.

Das Verhalten eines starr programmierten Automaten kann dann durch ein mathematisches Gebilde beschrieben werden: Im Verhaltensfeld ist eine gewisse Menge von Punkten dem Programm entsprechend markiert.

Man kann sich die Enttäuschung des Lesers vorstellen, wenn er statt des pulsierenden Lebens die Verteilung von Punkten in einer Zeichnung untersuchen soll! Von dieser Zeichnung kann man aber dann sehr leicht und einfach zu einem konkreten Mechanismus übergeben, der das soeben mathematisch beschriebene Verhalten besitzt.

Diesen Mechanismus bezeichnet man als Diodenmatrix.

Eine Diodenmatrix ist ein Netz von Drähten, die auf einen isolierenden Rahmen gespannt sind. Alle vertikalen Drähte sind über einen Stufenschalter oder irgendeinen anderen Kommutator mit dem Eingang des Gerätes verbunden. Die horizontalen Drähte bilden den Ausgang. Die Drähte sind in den Kreuzungspunkten nicht verbunden, sondern haben einen gewissen Abstand. Nur in den Kreuzungspunkten, die markierten Punkten des Verhaltensfeldes entsprechen, sind die Drähte durch Dioden verbunden, d. h. durch Leiter, die den elektrischen Strom nur in einer Richtung durchlassen.

Nun wird das elektrische Signal durch eine gewisse Kombination von Impulsen, die den Schalter steuert, auf einen bestimmten vertikalen Draht geleitet. Von diesem geht das Signal durch die Dioden auf alle horizontalen Drähte über, die mit dem gegebenen vertikalen Draht durch Dioden verbunden sind. Am Ausgang der Diodenmatrix steht dann ein Ausgabesignal, das darin besteht, dass an gewissen horizontalen Drähten Spannung liegt und an anderen nicht. Dieses Ausgabesignal (es kann z. B. mit einem Stufenschalter abgetastet, d. h. in eine Impulsfolge verwandelt werden) steuert nun die Reaktion der Maschine auf das gegebene Signal (die oben erwähnte Impulskombination).

Die Arbeit einer Diodenmatrix imitiert in gewisser Weise die Verarbeitung von Signalen in zweckmäßig handelnden Organismen.

In Wirklichkeit handelt kein lebender Organismus so, als ob ihn eine Diodenmatrix steuert, ausgenommen vielleicht die Infusorien im elektrischen Feld. Die Darstellung ist zu einfach, sie idealisiert den wahren Sachverhalt zu stark.

Dem betrachteten Fall direkt entgegengesetzt ist jener, bei dem die markierten Punkte im



Verhaltensfeld so erscheinen und verschwinden, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines markierten Punktes überall gleich ist. In diesem Fall kann jede Situation zu jeder Verhaltensweise führen; im Ausgang tritt reines Rauschen auf.

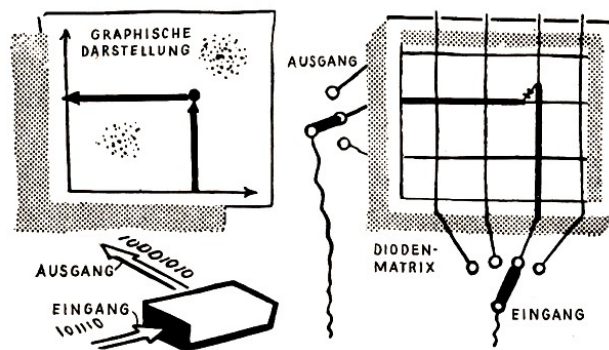


Bild 9.4.: Links die zweidimensionale grafische Darstellung des Verhaltens, rechts als technisches Modell zu seiner Realisierung eine Diodenmatrix.

Dieses sinnlose Verhalten kann man mit einer Matrix erzeugen, die aus der Diodenmatrix entsteht, wenn man einen Draht diagonal durch alle Kreuzungspunkte zieht und die Dioden durch Konjunktionselemente ersetzt.

Das sind Bauelemente mit zwei Eingängen und einem Ausgang, der dann und nur dann Strom führt, wenn beide Eingänge Strom führen. Ein Eingang des Konjunktionselements wird mit dem vertikalen, der andere mit dem diagonalen und der Ausgang mit dem horizontalen Draht verbunden. Schicken wir durch den diagonalen Draht die regellose Impulsserie eines Rauschgenerators, so erhalten wir auf einem horizontalen Draht einen Impuls, wenn der Impuls des Rauschgenerators und der Impuls, der die Situation beschreibt, zufällig aufeinandertreffen; dieser zufällige Impuls bestimmt das Verhalten.

Das wirkliche Verhalten eines lebenden Organismus liegt zwischen diesen beiden Extremen. Es wird durch eine ungleichmäßige Verteilung der Wahrscheinlichkeiten auf die Punkte im Verhaltensfeld charakterisiert: An manchen Stellen sind die Punkte fast immer markiert, an anderen fast nie.

Um ein solches Verhalten durch eine Matrix zu steuern, muss man in jedem Kreuzungspunkt der drei Drähte Speicher für Impulse anbringen, beispielsweise Kondensatoren, die durch den Ausgabeimpuls des Konjunktionselementes aufgeladen werden, sich wieder entladen und einen Impuls auf den horizontalen Draht schicken, wenn ihre Ladung einen bestimmten Wert erreicht hat.

Anstelle des Rauschens muss man durch den diagonalen Draht der Matrix Impulse schicken, die die Wahrscheinlichkeit für zweckmäßige Kopplungen von Situation und Verhaltensweise erhöhen und sie für unzweckmäßige erniedrigen. Dieser Draht muss daher ein Teil der Rückkopplung über die Umwelt sein.

Wir verlassen nun für einige Zeit die Drähte und Kondensatoren; wir betrachten das Verhalten lebender Objekte und seine mathematische Beschreibung.

... In einem hell erleuchteten Kreis, dem Gesichtsfeld des Mikroskops, drängen sich winzige Tröpfchen lebender Materie - Infusorien. Sie ernähren sich, teilen sich und bewegen sich. Im allgemeinen ist ihre Bewegung der Bewegung von Staubkörnchen in einem Lichtstrahl sehr ähnlich, sie ist vollkommen regellos.

Man kann eine Menge von Infusorien gleichzeitig betrachten oder die Bewegungen eines In-

fusoriums periodisch auf ein und dieselbe Platte aufnehmen - Unterschiede treten nicht auf. Selbständige Lebewesen, das Produkt einer langen Entwicklung, handeln ebenso wie die Teilchen der toten Farbe Gummigutt in den Versuchen des Physikers Brown; es sieht so aus, als ob sie überhaupt nicht zielstrebig handeln.

Das Fehlen eines zielstrebigem Verhaltens drückt sich aber nicht notwendig durch Untätigkeit aus, sondern in dem Fehlen einer Auswahl, einer Bevorzugung möglicher Handlungen vor anderen.

Aber nun bringen wir in das Wasser einen Tropfen Nahrung - Zuckerlösung. Binnen kurzem häufen sich die Infusorien an dieser Stelle. Die Regellosigkeit macht der kybernetischen Statistik Platz. Es entsteht eine Anisotropie in der Verteilung der Infusorien über das Gesichtsfeld. Wir erkennen, dass sie leben.

Die Teilchen der Farbe Gummigutt können von selbst keinen Haufen bilden: Eine solche Verteilung ist äußerst unwahrscheinlich.

Sorgfältige Beobachtungen zeigen, dass die Infusorien nicht erkennen, wo sich der Zucker befindet, und dass sie sich auch nicht zielstrebig auf ihn zu bewegen. Ihre Bewegungen sind stets regellos, und so gelangen sie zufällig zu dem Zucker. Sind sie aber in die Zuckerlösung geraten, so bewegen sie sich langsamer, sie halten sich daher länger an dieser Stelle auf.

Die Physik fordert eher das Gegenteil: Je mehr Energie ein System erhält, desto aktiver wird es. Für Lebewesen ist es unzweckmäßig, vor der Nahrung zu fliehen; tun sie das, so gehen sie zugrunde. Tun sie das Gegenteil, so können sie überleben und eine zahlreiche Nachkommenschaft haben, die das gleiche tut.

Viele Bemühungen der Biologen waren darauf gerichtet, festzustellen, ob Infusorien und andere Einzeller ein Gedächtnis haben und fähig sind zu lernen, ihr Verhalten zu vervollkommen.

Es ist zum Beispiel bekannt, dass das Infusorium einen elektrischen Schlag "nicht liebt". Gerät es in ein elektrisches Feld, so versucht es diesem zu entgehen, es kehrt um. Die Amöbe flieht die Berührung. In einer sich verengenden Röhre kehrt sie um und entweicht in den weiten Raum. Das sind angeborene Reaktionen, die allen Infusorien bzw. Amöben eigen sind.

Man stellte folgenden Versuch an. Man schirmte einen Teil eines Röhrchens mit Infusorien gegen das Licht ab. In regelloser Bewegung überquerten die winzigen Wesen sorglos die Grenze zwischen Licht und Schatten. Dann erhielten sie im Schatten einen elektrischen Schlag.

Nach einer gewissen Zeit begannen die Infusorien an der Grenze zwischen Licht und Schatten umzukehren, und zwar auch dann, als sie im Schatten kein elektrischer Schlag mehr erwartete. Eine Amöbe, die man viele Male in eine schmale Röhre hineintrieb, benötigte von Versuch zu Versuch immer weniger Zeit zur Umkehr.

Das Verhalten wies nach, dass die Einzeller aus den Versuchen etwas mitgenommen haben, was man schwerlich anders nennen kann als persönliche Erfahrung. Bei der mathematischen Darstellung ergibt das eine Anisotropie in der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten im Verhaltensfeld. Wodurch ist diese Anisotropie entstanden?

Wir wissen bereits, dass eine Vervollkommnung eines Organismus in der Herstellung von Rückwirkungen oder Rückkopplungen besteht, die seine Stabilität unter sich ändernden Umweltbedingungen sichern.

"Das ganze Leben", sagte der große sowjetische Physiologe I. P. Pawlow, "von den einfachsten bis zu den kompliziertesten Organismen, natürlich einschließlich des Menschen, ist eine lange Kette von Ausgleichsprozessen gegenüber der Umwelt, die sich immer weiter bis zur höchsten

Stufe komplizieren. Die Zeit wird kommen - mag sie auch noch fern sein -, in der die Mathematik, gestützt auf die naturwissenschaftliche Analyse, alle diese Prozesse einschließlich ihrer selbst durch gewaltige Formeln erklären wird."<sup>38</sup>

Die Selektion bildet eine gigantische Rückwirkung einer biologischen Art auf sich selbst, in der die DNS die Rolle eines Informationsspeichers spielt. Jede Zelle verwendet bei ihrem Lebensprozess Rückwirkungen, die den physikalisch-chemischen Zustand des Plasmas, den Säuregehalt, die Salzzusammensetzung, die Temperatur, die Geschwindigkeit von Zerfall und Aufbau, die Speicherung von Vorräten und das Tempo der Vermehrung stabilisieren. Ununterbrochen erfolgen Hemmungen und Aktivierungen von Fermenten, die die Reaktionen steuern. Das Verhalten der Organismen setzt die Kette der Ausgleichsprozesse, die Sammlung von Informationen, fort.

Der Blutzuckerspiegel des Menschen wird beispielsweise im Verhältnis 1 mg Zucker auf 1 cm<sup>3</sup> Blut konstant gehalten. Wenn der Zuckerspiegel steigt, dann scheiden spezialisierte Gewebe - Drüsen - das Hormon Insulin aus. Das Insulin verwandelt den Zucker in das unlösliche Glykogen, das in der Leber abgelagert wird. Ist zu wenig Zucker im Blut, so sondern andere Drüsen das Hormon Adrenalin ab, das den umgekehrten Prozess bewirkt - die Verwandlung von Glykogen in löslichen Zucker und seine Überführung ins Blut.

Dieses chemische Rückkopplungssystem ist in der Lage, Abweichungen vom obengenannten Verhältnis, die eine gewisse Grenze nicht übersteigen, zu beseitigen. Reicht diese Regulierung nicht aus, so werden Reservemechanismen zur Stabilisierung eingeschaltet. Überschüssiger Zucker wird durch die Nieren aus dem Organismus ausgeschieden, und das Gehirn arbeitet Informationen über die Störung des Zuckerspiegels in einen Widerwillen gegen Nahrung oder umgekehrt in einen Zuckermangel um, und diese Befehle bestimmen nun die Ziele und das Verhalten des Organismus als Ganzes.

Jede Zelle des Organismus eines Vogels, einer Katze oder eines Menschen kann ihre Temperatur teilweise selbst regeln, indem sie die Geschwindigkeit der Oxydationen erniedrigt oder erhöht. Übersteigt die Temperatur trotzdem einen bestimmten Wert, so werden andere Systeme zur Wärmeregulierung eingeschaltet: Die Schweißdrüsen öffnen sich, und die Haut dunstet eine Flüssigkeit aus, es entwickelt sich ein Pigment, das das Eindringen der Wärmestrahlen in das Gewebe verhindert. Ist auch das unzureichend, so erfolgen weitere Handlungen: Vögel und Katzen verstecken sich im Schatten, der Mensch baut sich ein Sonnendach.

Bei den einfachsten Organismen, bei denen sich noch keine Rückkopplungsstrukturen herausgebildet haben, bestimmen die Rückwirkungen der Umwelt das Verhalten.

Schicht man den abdunkelnden Schirm über der Röhre mit den Infusorien, die "den Schatten fürchten", zurück, so zeigt sich, dass die Infusorien an der Stelle umkehren, an der früher der Schatten war. Sie reagieren also nicht auf den Schatten, sondern auf die Spuren des erlittenen Schlages, die von ihnen dort als Abwehrstoffe zurückgelassen werden.

Ihr Gedächtnis ist also "oberflächlich". Die Vervollkommnung im Verhalten der oben erwähnten Amöbe ist offenbar darauf zurückzuführen, dass sich in ihrem Organismus Fermente angesammelt haben, die eine Verdünnung des Plasmas bewirken.

Entstehen durch die Selektion mehrzellige Organismen, so beginnt eine Spezialisierung der Zellen. Der größere Teil der äußeren Zellen wird zu einem Schutz der inneren Zellen, während einige Gruppen von Zellen sensomotorische Zellen, Zellen der Taxis bleiben.

---

<sup>38</sup>J. P. Pawlow: Vollständige Gesamtausgabe, Band 8, Buch 1.

Diese vervollkommen und spezialisieren ihre Reizbarkeit, sie werden leichter erregt und energischer gehemmt als die übrigen. Andere Zellen erzeugen spezifische Stoffe, die zur Erhöhung der Empfindlichkeit erforderlich sind, und dafür sichern die Taxiszellen die ständig wachsende Fähigkeit des ganzen Organismus, sich schon während seines eigenen Lebens an sich verändernde Umweltbedingungen anzupassen.

Bei den Hohltieren zum Beispiel finden die Physiologen ein sogenanntes "diffuses Nervennetz", das über den ganzen Körper verteilt ist. In ihrer Bedeutung für den Organismus sind die einzelnen Teile des Körpers durchaus nicht gleichwertig, und daher konzentriert sich der größte Teil der Nerven um die Mundöffnung.

Mit größer werdender Anzahl von Zellschichten tritt an die Stelle einer sensomotorischen Gruppe am gleichen Ort eine kleine Kette von Zellgruppen, die gewöhnlich von den äußeren Teilen des Körpers nach innen führt. Die äußeren Zellen entwickeln eine spezifische Empfindlichkeit gegenüber der physikalischen Natur und der Stärke von Signalen, die inneren sondern aktiv ein Hormon ab, das andere Zellen reizt, das Azetylcholin.

Die Zwischenzellen, die Neuronen, verstärken ihre Fähigkeit, Impulse des Ionenumbaus, die nahe der Zellhülle entstehen, in einer Richtung weiterzuleiten, sowie Dioden das tun.

An den Stellen, an denen sich die kleinen Ketten kreuzen, den Ganglien, entstehen Verbindungen von Zellen, die teilweise der Diodenmatrix ähneln. Der Organismus wird schließlich fähig, im Innern Information über Zweckmäßigkeit verschiedener Verhaltensweisen zu speichern.

Die Empfindlichkeit der spezialisierten äußeren Zellen, der Rezeptoren, erhöht sich in verschiedenen Richtungen. Die einen Zellen reagieren auf mechanische Bewegungen im Wasser. Wird der Organismus zu einem Landlebewesen, so bilden diese Zellen die Grundlage für Tastsinn und Gehör.

Andere erhöhen ihre Empfindlichkeit gegenüber chemischen Stoffen, die durch die Zellhüllen eindringen. Diese Zellen werden später zur Grundlage der Geruchs- und Geschmacksorgane und außerdem zu Interorezeptoren, die auf Stoffe reagieren, die der Organismus selbst für die innere chemische Regulierung herstellt.

Eine dritte Art von Zellen gibt Signale über die Änderung der Temperatur weiter. Schließlich haben einige "Rezeptor"-Zellen die Fähigkeit, Änderungen des elektromagnetischen Feldes in einem bestimmten Wellenlängenbereich wahrzunehmen; sie bilden die Grundlage des Sehvermögens.

Die Gruppe der Zellen als Ganzes und jede einzelne Zelle wählen aus dem äußeren Rauschen einen relativ schmalen Streifen des auf sie einwirkenden Spektrums von Signalen aus. "Ein Auge, das alle Strahlen sehen könnte, würde eben deshalb gar nichts sehen", schrieb Engels.

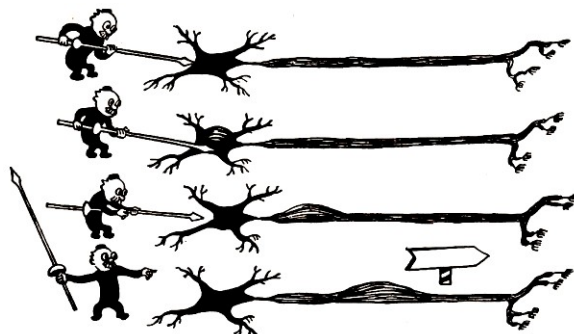


Bild 9.5.: Die Nervenzelle (das Neuron) wird bei unbedeutenden Einwirkungen nicht erregt. Ein stärkerer Reiz, der den Schwellenwert übersteigt, erregt sie ganz und gar. Die Erregung pflanzt sich dann längs der Nervenfasern (des Axons) bis zur Nachbarzelle fort.

Der Biologe Mast untersuchte die Empfindlichkeit der Organismen für verschiedene Bereiche des Lichtspektrums. Er stellte fest: Das Maximum der Wahrnehmung liegt für Regenwürmer im Bereich der Wellenlänge 483 nm, für die Maden der Fleischfliege bei 503 nm und für Kugelalgen bei 524 nm.<sup>39</sup> Zur Auslösung einer Erregung ist eine gewisse minimale Signalstärke nötig, die eine bestimmte Reizschwelle übersteigt.

Darüber hinaus ist die Erregung unabhängig davon, um wieviel die Stärke des Signals die minimale Stärke übersteigt. Diese Eigenschaft der Nervenzellen, der Neuronen, wurde zum ersten Mal 1871 von Bauditsch bemerkt: später nannte sie der bekannte Psychologe Wundt das Gesetz vom "Alles oder Nichts".

In der Sprache der exakten Wissenschaften nennt man diese Eigenschaft Extremalität, da "Extremum" die gemeinsame Bezeichnung für die beiden äußersten Punkte, für das Maximum und das Minimum eines jeden Prozesses ist. In der Technik bezeichnet man sie als Relaischarakteristik.

Das "Alles-oder-Nichts"-Prinzip ist eine ziemlich grobe Charakterisierung der Arbeitsweise von Neuronen.

Experimente ließen viele Abweichungen von diesem Prinzip erkennen (technische Relais arbeiten z.B. sicherer), für eine allgemeine Vorstellung von der Funktionsweise des Systems ist es jedoch zunächst ausreichend.

Ein zweites Prinzip, nach dem Nervenzellen arbeiten, bezeichnet man als dynamische Polarität. Dieses Prinzip besagt, dass die Erregung nicht sofort die ganze Zelle mit ihrem Fortsatz, ihrem Axon, erfasst. Die Erregung pflanzt sich vielmehr längs des Axons fort, und zwar vom Zellkörper fort. Hinter ihr her läuft eine Zone der Hemmung, die den Impuls daran hindert, sich auch rückwärts auszubreiten.

Die Stärke des Impulses schwankt in verschiedenen Neuronen zwischen 10 und 100 Mikrovolt und seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwischen 20 und 90 Metern in der Sekunde.

Die Nachrichten und Befehle, die der Nerv überträgt, sind durch die Frequenz der Impulse kodiert, die sich längs des Axons fortpflanzen. Der (größeren oder geringeren) Stärke des Reizes entspricht die Größe der Zeit, die zur Wiederherstellung der Empfindlichkeit notwendig ist, in der also das Neuron gehemmt ist, und damit der Abstand zwischen zwei benachbarten Impulsen.

Eine Vergrößerung des Drucks auf einen Druckrezeptor führt z. B. dazu, dass die Impulsfrequenz von 71 auf 125 Impulse in der Sekunde steigt. Der Kälterezeptor erhöht die Frequenz der Impulse mit fallender Temperatur. Die von dem Biologen G. Hensel veröffentlichten Diagramme<sup>40</sup> zeigen jedoch, dass einer Serie von Impulsen, die die absolute Größe des Reizes beschreiben, stets eine Serie vorausgeht, die anzeigt, wohin, in welche Richtung sich der Reiz ändert.

So sendet der Kältegeber bei einer Erhöhung der Temperatur eine Serie von sehr langsam aufeinanderfolgenden und bei einer Erniedrigung der Temperatur eine Serie von sehr schnell aufeinanderfolgenden Impulsen aus, und erst danach folgt eine Information über die wahre Höhe der Temperatur. Die Rezeptoren des Nervensystems übertragen ihre Nachrichten in einem gemischten Kode:

Ihre Signale sind abwechselnd deltamoduliert und kontinuierlich.

---

<sup>39</sup>1 nm (Nanometer) =  $10^{-9}$  m.

<sup>40</sup>Regelungsvorgänge in der Biologie, zusammengestellt von H. Mittelstaedt, R. Oldenbourg-Verlag, München 1956.

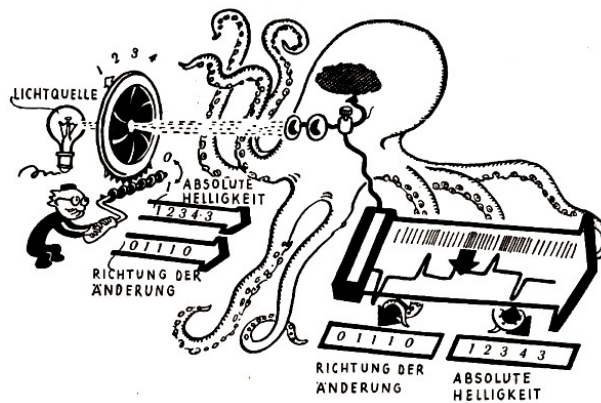


Bild 9.6.: Misst man gleichzeitig die Reizstärke und die Frequenz der Nervenimpulse, die durch die Axone laufen, so kann man zwei einander abwechselnde frequenzmodulierte Signale feststellen. Das eine zeigt die absolute Stärke des Reizes an, das andere, deltamodulierte, die Richtung ihrer Änderung.

Die von außen nach innen führenden Steuerketten des Organismus enden bei Zellen, die auf Kontraktionen spezialisiert sind, auf mechanische Änderungen der Form, die von der durch die "mittleren" Zellen der Ketten übertragenen Erregung hervorgerufen werden. Diese Zellen bewegen den Organismus, sie bilden sein Muskelgewebe.

So differenziert sich das sensomotorische System bei Mehrzellern. Das Auftreten von Symmetrien im Körperbau begünstigt diese Entwicklung. Die Symmetrie führt zunächst zur Bildung einer ganzen Reihe einzelner Steuerketten, die - entsprechend dem Ort, der gereizt wird (links, rechts, unten; oben) - die rechten, linken, unteren und oberen Muskeln aktivieren. Obwohl jede Kette nur ein Signal von 1 bit überträgt, nämlich "kontrahieren - nicht kontrahieren", realisiert die Gesamtheit der Ketten schon ein relativ kompliziertes Programm. Die Rückkopplung vom Ende der Steuerkette (Muskel) auf den Anfang (Rezeptor) führt hier durch die Umwelt.

Die Versuche des Biologen E. Holst an Fischen zeigen anschaulich die nächste Entwicklungsstufe: die Bildung innerer Rückkopplungen. Ein Fisch hält die Achse "Rücken-Bauch" vertikal mit Hilfe seiner beiden Lagerezeptoren, die beiderseits dieser Achse liegen und nur bei vertikaler Achse Signale gleicher Frequenz senden.

Ändert eine zufällige Störung (eine Welle, ein Stoß) die Lage der Achse, so verschieben sich diese Frequenzen unterschiedlich. Daraufhin gibt das Nervensystem Impulse an die Flossenmuskeln, und der Fisch korrigiert seine Lage zur Vertikalen.

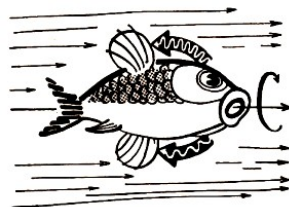


Bild 9.7.: Die Verschiedenheit der Signalfrequenzen, die nach der Operation auftritt, zwingt den Fisch, sich ständig nach einer Seite zu drehen. Er rotiert daher wie ein Kreisel.

Holst zerstörte bei einem Fisch die Sinneszellen eines Lagerezeptors und erreichte damit, dass die von beiden Lagerezeptoren ausgehenden Signale sich immer unterschieden. Der Fisch begann, um seine Längsachse zu rotieren und konnte keine Gleichgewichtslage mehr herstellen.

Das Zusammenwirken von steuernden Ketten erfordert eine Verknüpfung, eine Koordinierung

der Signale in den verschiedenen Ketten. Diese Verknüpfung wird von Nervenknoten (den Ganglien) durchgeführt, in denen die Ketten, die Nachrichten von den Rezeptoren übermitteln, mit den Steuerungsketten, die Befehle an die Effektoren geben, zusammentreffen.

Rückkopplungen, die von den Ganglien zu den Rezeptoren führen, setzen deren Empfindlichkeit in Beziehung zur Reizstärke. Betrachten wir beispielsweise das menschliche Auge.

Die Intensität der von den lichtempfindlichen Rezeptoren, die die Netzhaut des Auges bilden, aufgenommenen Reize werden durch unterschiedliche Impulsfrequenzen ins Gehirn übertragen. Die geringste Helligkeit, die das Auge wahrnimmt, verhält sich zur größten Helligkeit, die vom Auge verarbeitet werden kann, etwa wie  $1 : 10^{14}$ . Das Verhältnis der kleinsten zur größten Helligkeit ist, wie man sieht, gewaltig.

Man könnte nun annehmen, dass das Auge eine kleine Änderung der Helligkeit nicht wahrnimmt. Tatsächlich aber ist eine Änderung der Helligkeit um 15 Prozent für das Auge immer wahrnehmbar, und bei der normalen Helligkeit, für die das Auge eingerichtet ist, kann bereits eine Änderung um ein halbes Prozent bemerkt werden. Wie wird ein so breiter Empfindlichkeitsbereich erreicht?

Das Weber-Fechnersche Gesetz, das um die Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt wurde, besagt, dass die Stärke der Wahrnehmung dem Logarithmus der Reizintensität proportional ist. Nehmen wir an, dass das Auge einen Helligkeitsunterschied nur dann wahrnimmt, wenn die Helligkeitswerte mindestens im Verhältnis  $1 : 2$  stehen.

Dann können wir seinen ganzen Empfindlichkeitsbereich durch 47 Verdoppelungen erfassen, denn es ist ja  $\log_2 10^{14} = 14 \cdot \log_2 10 \approx 47$ .

Diese Rechnung ist derjenigen vollkommen analog, mit der wir die Größe einer Information berechnet haben: 47 bit sichern die Auswahl von einer Variante aus mehr als 100 Billionen möglichen.

Das Auge ist aber empfindlicher, als wir angenommen haben. Für die Übertragung der maximalen Empfindlichkeit ist eine noch größere Informationsmenge erforderlich, der Sehnerv liefert dem Gehirn aber je Sekunde nur eine Informationsmenge, deren Größe auf 10 bis 50 bit geschätzt

wird. Die Anpassung des Auges an die Lichtverhältnisse, die durch eine Rückkopplung zustande kommt, macht diese Differenz gegenstandslos. Im Hellen verengt sich die Pupille, im Dunkeln weitet sie sich. Das Signal, das bei einer Erhöhung der Helligkeit von der Netzhaut ausgeht, kehrt zum Auge zurück und ruft eine Verengung der Pupille hervor. Dadurch geht Information verloren, die Information wird unvollständig: Wir nehmen die absolute Größe der Helligkeit nicht wahr.

Diese ist jedoch im allgemeinen auch unwesentlich. Dafür können wir den relativen Helligkeitsunterschied sehr gut bestimmen, auf dem die visuelle Wahrnehmung der Form und der Farbe von uns umgebenden Gegenständen beruht.

Andere Rückkopplungen führen von den Muskeln zu den Nervenknoten. Sie übertragen Nachrichten über die Ausführung von Befehlen, über den Unterschied zwischen der tatsächlichen Lage und der Lage, die erreicht werden soll.

Die Rückkopplung kontrolliert auch die Stabilität der gegebenen Lage. Eine Störung dieses Systems kann dazu führen, dass es unmöglich wird, Bewegungen zu koordinieren.

Eine zeitweilige Ausschaltung der Rückkopplungen hat jeder erlebt, dem einmal das Bein "eingeschlafen" ist. Bevor ein heftiges Kribbeln einsetzt, das die Wiederherstellung der Empfindlichkeit ankündigt, beobachtet man erstaunt, dass man das Bein bewegen kann, dabei aber

nicht weiß, ob es sich bewegt: Das Bein erscheint wie etwas Hölzernes oder Fremdes, es meldet nichts über seine Lage.

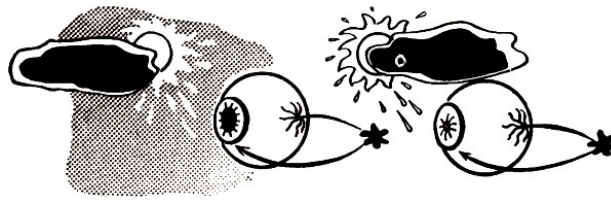


Bild 9.8.: Das Sehzentrum im Gehirn beantwortet die eintreffende Nachricht "das Licht wird schwächer" durch den Befehl "Pupille erweitern" (links). Wird es heller, so wird die Pupille verengt. In dieser Weise arbeitet die Rückkopplung der Adaptation.

Damit die Signale, die von Neuronenketten weitergeleitet werden, sich nicht überlagern und nicht verzerrt werden, nimmt der Organismus die umgebenden Zellen zu Hilfe. Einige, die Gliazellen, isolieren, ernähren und stützen die Nerven, andere füllen die Zwischenräume mit einer isolierenden fettartigen Substanz, dem Myelin.

An einigen Stellen ist die Nervenhülle unterbrochen: Hier erhalten schwache Impulse neue Energie, sie werden verstärkt. Allein in den Synapsen besteht eine Möglichkeit für einen Nervenimpuls, von einem Axon auf ein anderes Neuron und damit in eine andere Kette überzugehen.

Schritt für Schritt entwickelt der Organismus ein Signalsystem, das Nervensystem, das in der Lage ist, die Nachrichten aus der Umwelt und dem eigenen Körper in zweckmäßige Befehle umzuwandeln und dadurch ein den Umständen angepasstes Verhalten des ganzen Organismus zu sichern.

Eine Neuronenkette, die in einem Rezeptor beginnt, durch einen Nervenknötchen führt und in einem Muskel endet, heißt Reflexbogen. Da der Aufbau eines Reflexbogens durch das Vererbungsprogramm bestimmt wird, kann sich sein Verhalten während des gesamten Lebens des Organismus nicht wesentlich ändern, es sei denn, die Nerven werden von einer Krankheit befallen oder durch eine andere Ursache beschädigt. Daher bezeichnet man seine Funktionsweise als angeborenen Automatismus oder als unbedingten Reflex.

Ein Organismus, der nur unbedingte Reflexe besitzt, hätte, selbst wenn sie sehr kompliziert sind, ein sehr primitives Verhalten. Er wäre ein System mit einer festen Struktur und völlig bestimmten Eigenschaften, die z. B. nur eine Krankheit ändert.

Jede solche Änderung würde dem Organismus höchstwahrscheinlich schaden, sie würde den Aufbau seines Signalsystems wahrscheinlich unzweckmäßig verändern. Alle höheren Tiere vervollkommen jedoch im Laufe des Lebens ihr Verhalten, indem sie sich an die Umweltverhältnisse anpassen. Die Struktur ihres Signalsystems ändert sich in dieser Zeit; einige angeborene Reflexe, zum Beispiel der Trieb zur Fortpflanzung der Art, treten ziemlich spät zutage.

Aber die Hauptmasse der Information, die das Verhalten der Tiere bestimmt, lässt sich nicht durch die erblich bedingte Struktur des Nervensystems erklären; es ist eine andere Fähigkeit, die es ihrem Nervensystem ermöglicht, Information zu sammeln.

Reflexe einer neuen Form, die erworbenen oder bedingten Reflexe, wurden zum ersten Mal von dem sowjetischen Physiologen I. P. Pawlow eingehend untersucht. Mit großer Sorgfalt und Genauigkeit führte er Versuche durch, in denen das Gehirn eines Hundes von der einfachen Feststellung der Befriedigung des Hungerbedürfnisses Schritt für Schritt zu höchst komplizierten Varianten des Erkennens und Verhaltens gelangte.





Bild 9.9.: Das ist ein anschaulicher Versuch, der die Abhängigkeit der Empfindung von der Adaption zeigt. Hält man eine Hand in kaltes Wasser, die andere in heißes und danach beide in warmes, so widersprechen die Nachrichten über die Wassertemperatur einander.

Bis dahin war die alte Auffassung verbreitet, dass zumindest die niederen Tiere (wie Würmer, Bienen und Spinnen) nichts lernen, dass ihr ganzes Verhalten eine Kette von unveränderlichen, fest programmierten Handlungen darstellt.

"An diese Ansicht hielten sich jene, die ihr Wissen daraus schöpften, dass sie mit Begriffen jonglierten und Versuche vernachlässigten", bemerkt J. Dembowskij. "Ihre Arbeit ist nicht besonders exakt", sagt er über das Verhalten von Bienen und Spinnen, "auch ist sie nicht immer ein und dieselbe. Diese Tiere passen sich veränderten Umweltbedingungen ausgezeichnet an."

Im Jahre 1939 führte der Biologe R. Tauer einen einfachen Versuch durch. Er maß die Temperatur eines Nesthockers und die Temperatur der ihn umgebenden Luft. Es zeigte sich, dass der Nesthocker in den ersten zehn Tagen seiner selbständigen Existenz nicht einmal die Körpertemperatur reguliert. Erst nach fünfzehn Tagen wird diese von der Lufttemperatur fast unabhängig.

Die Regelung der Temperatur, der Zusammensetzung des Blutes und anderer Parameter mit Hilfe einer Rückkopplung auf einen konstanten Wert ist für die Tiere unzweckmäßig, da ihr Leben einem rhythmischen Wechsel unterliegt: bald schläft das Tier, bald ernährt es sich, bald bewirkt es seine Vermehrung, und jedem Zustand müssen spezielle Parameterwerte entsprechen. Im Schlaf wird im Organismus eines Menschen eine andere Bluttemperatur eingeregelt als im Wachen.

Die Rückkopplungen des Organismus bilden Ketten von Nachlaufsystemen mit Programmsteuerung. Sie werden in Abhängigkeit vom Verhaltensrhythmus eingeschaltet; bei Ratten zum Beispiel gibt es, wie man vermutet, etwa 15 verschiedene Lebensrhythmen.

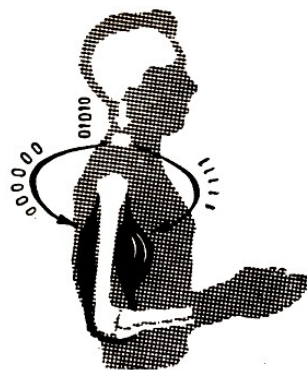


Bild 9.10.: Der Befehl, der aus dem Gehirn in den Nervenknotten gelangt, bewirkt die Abwicklung zweier entgegengesetzter Programme: zu aktivierender Muskel - "zusammenziehen", antagonistischer Muskel - "erschaffen".

Neue Information kann bekanntlich nur auf der Grundlage bereits vorhandener gesammelt werden. Im Nervensystem eines Tieres muss es ererbte Kriterien für das Verhalten geben, vor allem die Fähigkeit, gewisse Nachrichten und Befehle nach dem Prinzip "ja - nein" in

zwei Gruppen einzuteilen: Das Gefühl der Satttheit gehört beispielsweise zu "ja", Schmerz und Hunger gehören dagegen zu "nein".

Schon bei den einfachsten Organismen ist mit dem Kriterium "nein" eine steigende Aktivität und ein Rauschen im Steuersystem, das die Suche bewirkt, verbunden und mit dem Kriterium "ja" die Ruhe.

Ferner bestehen mehr oder weniger reine "Tropismen": Hydren bewegen sich stets zum Licht hin, Würmer, Wanzen und neugeborene Ratten stets vom Licht weg. Die Wahrnehmung des Lichts ist bei Hydren mit dem Verhaltenszentrum "ja" und bei Wanzen mit dem Zentrum "nein" verbunden (diese Verbindung kann sich manchmal auch ändern). Entsprechend sind die Annäherung an eine Reizquelle und die Entfernung von ihr mit "ja" bzw. "nein" verknüpft.

Auf der Grundlage der primären Kriterien wird in den Nervenknotten und besonders in dem Kopf- oder Oberschlundganglion, das sich allmählich zum Gehirn erweitert, Information über sekundäre Kriterien gesammelt, die spezielleren Zielen des Verhaltens entsprechen.

Leider ist das anatomische und physiologische Material noch unzureichend, um genau zu unterscheiden, ob im Nervensystem ein statisches oder ein dynamisches Gedächtnis vorliegt. Ein Gedächtnis kann durch geschlossene Kreise realisiert werden, in denen Folgen von Signalen zirkulieren: diese Form bezeichnet man als dynamisches Gedächtnis.

Die Anatomen entdeckten bei mikroskopischen Untersuchungen des Nervengewebes geschlossene Neuronenbahnen, und die Hypothese vom dynamischen Gedächtnis der Lebewesen gewann eine gewisse Popularität.

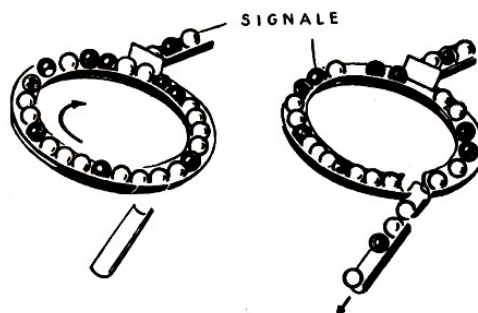


Bild 9.11.: Modell eines dynamischen Gedächtniskreises (links), in dem Signale auf unbestimmte Zeit zirkulieren können, bis sie gebraucht werden (rechts).

Dagegen spricht jedoch die bemerkenswerte Stabilität des Erinnerungsvermögens, das selbst bei einer zeitweiligen Durchblutungsstörung des Nervengewebes erhalten bleibt. Es ist wahrscheinlicher, dass bestimmte Neuronen irgendein Potential speichern - z. B. eine Azetylcholinmenge in der Synapse -, wie das die Elemente der oben beschriebenen "statistischen Verhaltensmatrix" tun; das Merken reduziert sich dann auf eine Neuverteilung dieser Potentiale im Gewebe. Ist das der Fall, so liegt im Nervensystem in der Hauptsache ein statisches Gedächtnis vor.

Der Verfasser hofft, dass der aufmerksame Leser hier einen schon bekannten Gedankengang erkennt. Es ist uns nämlich mehr oder weniger gelungen, das Problem des Verhaltens auf ein bekanntes Bild zurückzuführen - auf die Verteilung von Punkten in einem Feld. Diese Verteilung besitzt eine gewisse Struktur, wir kennen ihre physikalischen und kybernetischen Eigenschaften.

Etwas Ähnliches haben wir im Zusammenhang mit dem Problem der Entstehung des Lebens beobachtet. Man kann erwarten, dass diese Struktur in voller Übereinstimmung mit dem Entropiesatz danach strebt, dem molekularen Chaos ähnlich zu werden. Was bedeutet das für das

Verhalten?

Natürlich das Vergessen. Beobachtet man diese Erscheinung im Leben? Zweifellos. Viele Fertigkeiten und Verhaltensformen gehen verloren, wenn sie nicht durch Training, durch Wiederholung gefestigt werden.

Man kann daher vermuten, dass bestimmte Kontrollrückkopplungen dieser Tendenz zum Anwachsen der Entropie entgegenarbeiten und den Einfluss der Störungen beseitigen. Wir unterscheiden zwei Arten von Störungen, die das Verhalten verändern, nämlich äußere und innere. Störungen, die das Verhaltensfeld selbst betreffen, führen zum Vergessen und werden von Zeit zu Zeit dadurch beseitigt, dass die doppelt, an verschiedenen Stellen des Gedächtnisses gespeicherten Kodewörter verglichen werden. Das, was wir auf keinen Fall vergessen dürfen, holen wir ab und zu aus dem Gedächtnis hervor und wiederholen es.

Äußere Störungen des Verhaltens entstehen in der Umwelt und im Körper des Tieres. Es besteht immer eine Nichtübereinstimmung zwischen der Situation im Gedächtnis und dem vorliegenden Sachverhalt. Und die langen Ketten der physikalisch-chemischen Umwandlungen in den Nerven und Muskeln, die durch einen Befehl des Gehirns hervorgerufen werden, führen niemals ganz zu der im Programm vorgesehenen Handlung. Der lebende Organismus ist stets und prinzipiell unexakt.

In einem Versuch wurde ein Spinnennetz mit einer klingenden Stimmgabel berührt. Die Spinne lief zu dem Berührungspunkt, wie sie das stets tut: Gewöhnlich geht ein Vibrieren des Netzes von einer Fliege aus, die in das Netz geraten ist. Dann wurden der Spinne ein oder zwei Beine auf derselben Körperseite entfernt. Die Spinne wich nicht nach einer Seite ab, obwohl die alten Bewegungsprogramme offensichtlich nicht mehr geeignet waren. Die Beine auf der verletzten Seite begannen energischer zu arbeiten als die anderen.

Durch ihre Sinnesorgane erfasste die Spinne die Nichtübereinstimmung zwischen der gewählten Richtung und der Bewegung ihres verkrüppelten Körpers und beseitigte sie durch eine Änderung der Bewegungen. Eine Wasserwanze wurde auf einem Auge geblendet. Zuerst kreiste sie wie der Fisch in den Versuchen von Holst, aber später wurden ihre Bewegungen normal. Ein Hund, der eine Pfote verloren hat, lernt auf dreien zu laufen. Ein Hund, der beide Hinterpfoten verloren hat, geht auf den beiden vorderen wie ein Vogel, wobei er den Hals vorreckt, um das Gleichgewicht zu halten. Die Rückkopplungen kompensieren die Störungen, sie sichern die Erfüllung der allgemeinen Aufgaben des Verhaltens.

Wir fahren fort mit der Übertragung der Eigenschaften der Verhaltensmatrix - und damit der kybernetischen Statistik - in die Sprache des Verhaltens.

Wir erwarten, dass neue nützliche Fertigkeiten nur auf Kosten äußerer Informationspotentiale entstehen können, und dieser Prozess kann nur nach dem Prinzip von "Versuch und Irrtum" ablaufen.

Die Psychologen, insbesondere der berühmte Thornbike, haben diese Tatsache festgestellt. Man kann sie an einem anschaulichen Beispiel erläutern. In letzter Zeit erschienen ziemlich viele utopische Romane über Reisen in den Kosmos. Der Leser landet nach dem Willen des Autors irgendwo auf der Venus oder auf dem Mars und entdeckt eine hügelige farbenschillernde Fläche, auf der sich eigentümliche pilzförmige Dinge erheben. Sind es Gebäude, Pflanzen oder vielleicht denkende Wesen? Der Autor verrät das nicht sofort.

Dem Leser steht bevor, diese Welt zu betreten und in ihr zu leben. Vorsichtig setzt er die zitternden Füße vor die Luke des Raumschiffs und berührt die Fläche ...

Oh, es ist eine Fläche, es ist etwas, worauf man sich stützen kann! Dennoch ist der Raumfahrer unsicher, die Spannung in den Knien prüfend und mit ungeschickten Bewegungen erfolgt der erste Schritt auf dem fremden Planeten. Ist es hier glatt, schwankt die Fläche, bricht sie nach dem ersten Schritt durch?

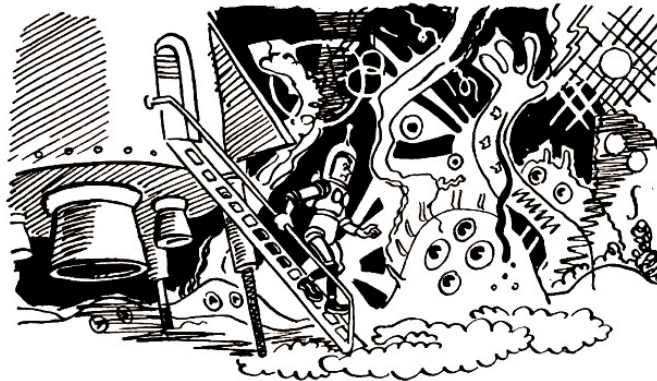


Bild 9.12.: In eine seltsame Umgebung gerät der Weltraumflieger nach dem Willen des phantasievollen Schriftstellers.

Die Kosmonauten stellen diese Fragen weder sich selbst noch ihren Gefährten. Sie prüfen nur die Ergebnisse ihrer Bewegungen. Allmählich machen sie sich mit der Form dieser Welt vertraut. Sie stellen die Lichtrichtung und die perspektivische Verzeichnung der Gegenstände fest, beginnen den Raum visuell wahrzunehmen und erhalten dadurch erst die Möglichkeit, sich weiterzubewegen, ohne die Stirn an einer geisterhaften Wand zu stoßen.

Eine schwierige Aufgabe! Aber noch schwieriger ist die Aufgabe, die ein neugeborenes Kind mit seinem Eintritt in unsere gewöhnliche irdische Welt löst. Es führt Bewegungen aus - das sind zufällige Bewegungen, da es aus der Menge der Möglichkeiten, die der Bau seiner Hände und Beine zulässt, keine bevorzugen kann.



Bild 9.13.: Das Kind probiert ständig viele Verhaltensvarianten aus, um sich entsprechend den Nachrichten über Erfolg oder Misserfolg seiner Handlungen diejenigen von ihnen zu merken, die zweckmäßig sind.

Jede Variante bleibt eine gewisse Zeit im Gedächtnis. Führt eins der Programme zu einem Ergebnis (gelingt es dem Säugling etwa, einen Ball oder den Schnuller zu erfassen), so wird der Erfolg registriert.

So wird im Signalsystem Information gesammelt. Das Prinzip besteht hier ebenso wie bei der Vererbung darin, dass das System zufällige Aktionen ausführt und durch die Rückwirkung der Umwelt auf das System die Zweckmäßigkeit dieser Aktionen nach gewissen Kriterien einschätzt.

Durch Tausende von Versuchen mit Tieren wurde das Prinzip der "natürlichen Auslese" von Verhaltensformen geprüft. Einem aus seinem Loch herausgekrochenen Wurm schob man feuchte Erde unter und eine Reihe von Schmirgelpapierstückchen, die ihm zuwider sind. Der blinde Wurm tastete, probierte, irrte sich, fand aber den Weg zur Nahrung.

Tauben legte man Körner verschiedener Farbe und Größe vor, wobei man einige Körner auf einem Brettchen festklebte. Man jagte Mäuse und Ratten mehrmals durch Labyrinth. Stets trat nach einer Reihe von zufälligen Versuchen eine plötzliche "Mutation des Verhaltens" ein, das Tier fand eine unter den gegebenen Bedingungen zweckmäßige Verhaltensform, und diese ging schließlich in eine kaum Aufmerksamkeit erfordernde Gewohnheit über.

Waren aber die Versuche rein zufällig?

Nein, fast niemals sind sie vollkommen zufällig. Der Organismus geht bei seinen Versuchen von einem schon erhaltenen positiven Ergebnis aus und sucht meistens in einer bestimmten Richtung. Die wichtigste Eigenschaft des Verhaltens besteht in der Voraussicht möglicher Folgen, d. h. in der Voraussicht des Ergebnisses von noch nicht durchgeführten Handlungen.

"Wenn ein Affe einen Turm baut, um eine Frucht zu erreichen", sagte Pawlow, "so kann man das keinen bedingten Reflex nennen. Es handelt sich um einen Fall der Entstehung von Wissen, um das Erfassen des normalen Zusammenhangs der Dinge." Der Biologe L. Krischinski bezeichnete diese Form des Verhaltens als "extrapolierten Reflex".

In den Versuchen von Kruschinski pickt ein Vogel Körner aus einem Futternäpfchen, das an ein bewegliches Band angebunden ist. Wird das Näpfchen in einen Tunnel gezogen, so eilt der Vogel zum Ausgang des Tunnels; er sieht den Ort voraus, an dem das Näpfchen wieder erscheint.

Das Verhalten der Tiere und des Menschen wurde zu verschiedenen Zeiten mit verschiedenen Methoden untersucht. Einige Gelehrte und Liebhaber beobachteten einfach, sie sammelten Fakten. Descartes und viele andere bemühten sich, bei Tieren Züge von automatischen Maschinen zu finden. Da aber die damaligen Maschinen sehr primitiv waren, zeigte sich stets, dass die einfache Hausfliege "klüger" war als eine Maschine und zweckmäßiger handelte. Die sogenannte "Gestaltpsychologie" verfiel ins andere Extrem: Sie wunderte sich und begriff nichts, da sie fürchtete, bei einer Analyse die "Ganzheit" des Verhaltens und der Wahrnehmung zu verlieren.

Der von Watson begründete "Behaviorismus" lehnte es prinzipiell ab, etwas über das auszusagen, was im Inneren eines Tiers vergeht: Die Behavioristen beschrieben nur das äußere Verhalten. Pawlow setzte sich kühn über diese Einschränkung hinweg.

In seiner Vorstellung waren Tier und Mensch "ein System (grob gesagt, eine Maschine) wie jedes andere in der Natur, das den unumgänglichen und für die ganze Natur einheitlichen Gesetzen unterworfen ist, aber ein System, das nach unseren heutigen wissenschaftlichen Kenntnissen einzigartig ist in der Höhe seiner Selbstregulierung".

Pawlow untersuchte nicht nur die äußeren Verhaltensformen der Tiere sorgfältig, sondern äußerte auch kluge Hypothesen über das, was im Innern vor sich geht. Leider war beim damaligen Stand der Technik noch kein Experiment zur Überprüfung der Frage möglich, ob ein "System", das nur das hat, was Pawlows Hypothesen ihm zubilligen, sich so verhält wie das untersuchte Lebewesen. Aber Pawlow sah und billigte das erste kybernetische Modell eines Tieres. Das war der elektronische "Hund", der 1935 im Leningrader Werk "Swetlana" auf Initiative des Ingenieurs G. Babat gebaut wurde.

Die Kybernetik geht im Labyrinth der psychologischen Probleme einen eigenartigen Weg. Sie untersucht parallel das Verhalten eines Tieres und das Verhalten eines Modells, das sie auf dem Papier oder aus irgendwelchen Werkstoffen geschaffen hat. Sie sucht Unterschiede zwischen den Eigenschaften des Modells und des Objekts, um an dem

Modell notwendige prinzipielle Ergänzungen vorzunehmen. Diese Methode bildet die Grundlage jeder Wissenschaft.

"Solange man ein Ding oder einen Prozess nicht zergliedern kann", sagt J. Bernal, "kann man mit ihm nichts anfangen, als es (bzw. ihn) als unteilbares Ganzes zu beobachten. Solange man nicht die einzelnen Teile wieder vereinigen und das Ding als handelndes Ganzes wiedererschaffen kann, fehlt die Möglichkeit, sich davon zu überzeugen, ob man bei seiner Analyse etwas Neues hineingetragen oder etwas vernachlässigt hat."

## 10 Modelle, in ihnen spiegeln wir die Welt wider



Ein Modell sagt die Zukunft voraus - Modellbildung - Physikalisch und abstrakte Modelle - Modell, Erkenntnis und Verhalten - Die Aussagenlogik und ihr abstraktes Modell - der Aussagenkalkül - Schaltalgebra - Logik im Nervensystem - Induktive Logik.

In manchen Legenden oder Sagen begegnen uns Helden mit einer besonderen Eigenschaft: Sie sehen die Zukunft in allen Einzelheiten voraus. Während sich die normalen Sterblichen abrackern und versuchen, ihr Schicksal zum Besten zu wenden, sieht jener Held allem unbeteiligt zu und weiß im voraus, wie sich die Zukunft gestaltet.

Alle märchenhaften Eigenschaften erweisen sich bei näherer Betrachtung als Übertreibung von Fähigkeiten, die die Menschen besitzen. So steht es auch mit der Voraussicht - der Mensch ist tatsächlich in der Lage, in gewissem Umfang zukünftige Ereignisse vorzusehen.

Er weiß teilweise im voraus, was geschieht, wenn er ein Glas, das er in der Hand hält, loslässt. Er weiß genau, dass es zu Boden fallen wird, aber er weiß nicht genau, ob es am Boden zerbrechen wird. Das hängt von verschiedenen Umständen ab, die sich im Augenblick teilweise seiner Kenntnis entziehen; er kann nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit, die je nach Fallhöhe und den Eigenschaften von Boden und Glas kleiner oder größer ist, dafür angeben, dass das Glas heil bleibt.

Wie ist es möglich, die zukünftigen Ereignisse - wenn auch nur zum Teil - vorzusehen? Aus der Zukunft erhalten wir doch niemals irgendeine Information. In der Information über Vergangenheit und Gegenwart ist aber stets auch Information über die Zukunft enthalten.

Die Möglichkeit vorzusehen, ergibt sich aus einer grundlegenden Erfahrung, dass sich nämlich die Naturgesetze im Laufe der Zeit nicht ändern. Daher ist jedes Naturgesetz eine Aussage über Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Wenn wir also in der Vergangenheit einen Prozess beobachtet haben, der im wesentlichen nach einem Naturgesetz abläuft, von diesem Gesetz determiniert wird, und wir haben diesen Zusammenhang erkannt, so können wir voraussagen, wie ein derartiger Prozess unter den gleichen Bedingungen in der Zukunft ablaufen wird, nämlich genauso.

Wir wissen, ein Stein fällt zur Erde, weil die Erde und der Stein Massen sind und Massen einander anziehen, ganz gleich, wann wir den Stein loslassen.

Nun gibt es aber auch Prozesse, deren Ablauf von Zufällen beeinflusst wird. Der Verlauf eines solchen Prozesses in der Zukunft ist durch seine Vergangenheit nicht eindeutig bestimmt, er kann daher auch nur teilweise vorausgesagt werden. Handelt es sich bei diesen Zufällen um subjektive Zufälle, d. h. um Erscheinungen, die wir für zufällig halten, weil uns die Ursachen

für diese Erscheinungen noch verborgen sind oder praktisch nicht erfasst werden können, so können wir unsere Voraussagen verbessern, indem wir diese Erscheinungen erforschen und ihre Auswirkungen in Rechnung stellen.

Gegen den objektiven Zufall, wie er uns in der Atomphysik gegenübertritt, sind wir in diesem Sinne machtlos, hier können tatsächlich nur statistische Voraussagen gemacht werden.

Die Vielzahl der Details, unter denen ein Prozess abläuft, macht es häufig unökonomisch, wenn nicht sogar praktisch unmöglich, alle diese Vorgänge quantitativ und qualitativ zu berücksichtigen, so dass man sich schon aus praktischen Gründen mit statistischen Voraussagen zufriedengibt.

Diese Vielfalt ist es auch, die zu Vereinfachungen, zu Idealisierungen zwingt, wenn man einen gegebenen Prozess auf ihm zugrunde liegende Gesetzmäßigkeiten hin untersucht. Vereinfachung bzw. Idealisierung bedeutet dabei, dass man die Untersuchung auf die für diesen Prozess wesentlichsten Zusammenhänge beschränkt, genauer, auf jene Zusammenhänge, die man nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnis für die wesentlichsten hält, mit anderen Worten - ein (vereinfachtes) Modell des Prozesses konstruiert und studiert.

Ein Modell eines Objektes ist also ein Produkt der Erkenntnis, es spiegelt dieses Objekt (im allgemeinen in vereinfachter Form) mehr oder weniger genau wider.

Bei der Arbeit mit einem Modell können wir zwei Etappen unterscheiden: In der ersten Etappe wird auf Grund der beobachteten und erkannten Zusammenhänge das Modell konstruiert. In der zweiten Etappe werden die aus dem Modell abgeleiteten Aussagen über das modellierte Objekt in der Realität überprüft. Je nach dem Grad der Übereinstimmung zwischen den aus dem Modell abgeleiteten (vorausgesagten) Eigenschaften des Objektes mit seinen wirklichen Eigenschaften ist dann zu entscheiden, ob und wie das Modell (durch Berücksichtigung weiterer Zusammenhänge) verbessert werden muss oder ob es bereits befriedigende Voraussagen ermöglicht.

Betrachten wir beide Etappen unter dem Informationsaspekt, so erkennen wir leicht, dass in der ersten Etappe Information verlorenggeht, nämlich jene, die in den Details steckt, die wir zunächst als unwesentlich für den Fortgang des modellierten Prozesses vernachlässigt haben. Dieser Informationsverlust ist im allgemeinen dadurch bedingt, dass unsere geistige Kapazität (sowohl die der Sinnesorgane als auch die des Gehirns) nicht dazu ausreicht, um eine Vielzahl von Informationen gleichzeitig zu verarbeiten, insbesondere nach ihrer Bedeutung für das betrachtete Objekt einzuschätzen. Man nimmt also in der ersten Etappe bei der Modellbildung einen Informationsverlust bewusst in Kauf.

In der zweiten Etappe wird dagegen durch Vergleiche des Modells mit der Realität und seine Verbesserung Information gesammelt. Dabei wird der in der ersten Etappe erlittene Informationsverlust nach und nach wieder ausgeglichen, soweit das für die verfolgten Zwecke notwendig ist. Man kann zwei Arten von Modellen unterscheiden, nämlich physikalische (konkrete) und mathematische (abstrakte).

Als physikalisches Modell eines Gegenstands oder eines Prozesses bezeichnen wir ein konkretes physikalisches System, dessen Eigenschaften den zu modellierenden Eigenschaften des betrachteten Gegenstandes bzw. Prozesses in einem bestimmten Sinne analog sind.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse, wenn man die zu modellierende Eigenschaft selbst als analoge Eigenschaft des Modells wählt. Diese Überlegung führt zu den sogenannten "maßstäblichen Modellen", die in vielen Bereichen der Technik verwendet werden.



In der Aerodynamik benutzt man z. B. maßstäbliche Modelle von Flugzeugen oder Teilen davon zur Prüfung, ob die theoretisch errechnete Form des Flugkörpers sich in der Praxis so verhält, wie man es vorausberechnet hat.

Diese Prüfung findet im sogenannten Windkanal statt, wo die realen Windverhältnisse, denen das Flugzeug später ausgesetzt sein wird, nachgebildet werden. Eine solche Prüfung ist notwendig, weil bei der mathematischen Behandlung der Konstruktionsprobleme (der Aufstellung eines mathematischen Modells) stets aus ökonomischen Gründen Vereinfachungen und Idealisierungen durchgeführt werden müssen, deren Auswirkungen geprüft werden müssen.

Bei der städtebaulichen Planung benutzt man maßstäbliche Modelle, um eine Übersicht über die Auswirkungen der geplanten Neubauten auf das Stadtbild zu erhalten, um zu prüfen, ob Altes und (geplantes) Neues miteinander harmonieren.

Besondere Bedeutung in der Kybernetik besitzen die elektrischen Modelle, bei denen die zu modellierenden Eigenschaften des Objekts durch elektrische Eigenschaften dargestellt werden. Auf diese Weise kann z. B. ein zweiarmiger Hebel durch einen Transformator modelliert werden: Das Verhältnis der Hebellängen ist dabei reziprok dem Verhältnis der Windungszahlen der beiden Transformatorwicklungen, den beiden den Hebel im Gleichgewicht haltenden Kräften entsprechen elektrische Wechselspannungen.

Ein mathematisches Modell ist ein System von Begriffen, von Eigenschaften und von Beziehungen zwischen diesen Begriffen. Unsere Begriffe vom uns umgebenden Raum, von Punkten, Geraden, Ebenen und den Beziehungen zwischen diesen (abstrakten) Gegenständen, kurz die dreidimensionale Euklidische Geometrie, ist ein mathematisches Modell gewisser Erscheinungen unserer Umwelt, nämlich der Raumeigenschaften.

Wenn jene Funktionen, die Lösungen einer bestimmten Differentialgleichung sind, gerade die Schwingungen eines schwingfähigen mechanischen, elektrischen oder pneumatischen Systems beschreiben, dann ist diese Differentialgleichung ein Modell dieses Systems. An diesem Beispiel kann man ersehen, dass ein und dasselbe mathematische Modell Modell verschiedenartigster physikalischer Systeme sein kann (die dabei untereinander physikalische Modelle füreinander sind).

Weiter unten werden wir die Aussagenlogik - ein Teilgebiet der mathematischen Logik - kennenlernen, die ein mathematisches Modell für einen Teilbereich des (formalen) logischen Schließens ist.

Der Mensch studiert und erkennt die Welt (einschließlich seiner selbst) durch Modelle, die die komplizierten Zusammenhänge in der Welt mehr oder minder vereinfacht widerspiegeln. Sein gesamtes Wissen über die Welt bildet also ein (entsprechend seinen Kenntnissen) mehr oder minder vollkommenes abstraktes Modell der Welt.

Dieses Modell, das er durch Abstraktion aus der Wirklichkeit, durch Sammeln von Information (sei es direkt durch eigene Erfahrung oder indirekt durch Aneignung fremder Erfahrungen - sich belehren lassen) ständig vervollkommnet, befähigt ihn, die Zukunft teilweise vorauszusehen. Mit Hilfe dieses Modells kann er die Folgen seiner Handlungen einschätzen.

Obwohl er das Glas, das er in der Hand hält, vielleicht noch niemals fallen gelassen hat, kommt er in Verallgemeinerung ähnlicher Vorfälle zu dem Ergebnis, dass es höchstwahrscheinlich zerschellen wird, wenn er es fallen ließe. Diese Voraussicht befähigt ihn auch, unter den in einer gegebenen Situation möglichen Verhaltensweisen die (nach einem bestimmten Kriterium, z. B. Selbsterhaltung oder Arterhaltung) günstigste auszuwählen, ohne erst alle Verhaltensweisen

durchzuprobieren, was im allgemeinen auch gar nicht möglich ist.

Diese Auswahl wird so vorgenommen, dass der Mensch die in der betreffenden Situation möglichen Verhaltensweisen an seinem Modell der Welt ausprobiert (im täglichen Leben sagt man dafür, dass er die Folgen seines Verhaltens bedenkt) und dann jene Verhaltensform in die Tat umsetzt, deren Ergebnis am Modell seinem Ziel am besten entspricht.

Ist z. B. jemand in einem oberen Geschoss eines brennenden Hauses durch das Feuer von der Treppe abgeschnitten und keine Hilfe in Aussicht, so bleiben ihm nur die Möglichkeiten, aus einem Fenster zu springen oder nichts zu tun und zu verbrennen.

Wenn das Ziel seines Verhaltens im Überleben besteht, so wird er aus dem Fenster springen, weil die Überlebenschance bei dieser Verhaltensweise größer ist. Zur Verringerung der Fallgeschwindigkeit kann er dabei einen Fallschirmersatz, z. B. ein Bettlaken über sich halten. Sein Modell von der Umwelt erweist sich als unvollkommen, wenn sich später herausstellt, dass sich in dem Haus noch eine andere Treppe befindet oder eine Feuerleiter an der Außenwand angebracht ist bzw. andere Hilfsmittel vorhanden sind, von denen er nichts wusste.

Wir wollen nun ein abstraktes mathematisches Modell für einige Beziehungen konstruieren, die beim (formalen) logischen Schließen auftreten, die - wie wir sagen wollen - denotwendig sind.

Ein logischer Schluss ist zum Beispiel der folgende:

Aus den beiden Aussagen: 'Wenn es regnet, so ist die Straße nass' und 'Es regnet' folgt die Aussage 'Die Straße ist nass'.

Genauer müsste man eigentlich sagen: Aus der Wahrheit der beiden genannten Aussagen ergibt sich logisch, dass die Aussage 'Die Straße ist nass' wahr ist.

In der Umgangssprache wird der Begriff "logisch" in einer viel weiteren Bedeutung gebraucht, z. B. im Sinne von "physikalisch notwendig", wenn jemand sagt: "Es ist logisch, dass ein Glas zu Boden fällt, wenn man es loslässt" oder "Es ist logisch, dass die Straße nass ist, sobald es regnet".

Wir bezeichnen hier aber als "logisch" nur solche Folgerungen, die denotwendig sind. Die physikalischen Gesetze sind aber nicht denotwendig, man kann sich ja durchaus vorstellen, dass das losgelassene Glas nicht zu Boden fällt (wie das z. B. in einem Erdsatelliten der Fall ist, wenn nicht künstlich eine Schwerkraft erzeugt wird) oder dass eine Straße auch bei Regen nicht nass wird (wenn sie z. B. überdacht ist).

Aber es ist undenkbar, dass die beiden erwähnten Aussagen wahr sind und die dritte nicht, solange wir der Aussagenverbindung "wenn - so" die übliche Bedeutung zuerkennen.

Um unser Modell für einen Bereich des logischen Schließens aufzubauen, müssen wir uns zuerst überlegen, was die Bausteine unseres Modells sein sollen. Außerdem müssen wir uns überlegen, welche Eigenschaften von diesen Bausteinen widergespiegelt werden sollen und welche Beziehungen zwischen diesen Bausteinen widergespiegelt werden sollen.

Die Frage nach den Bausteinen unseres Modells ist die Frage nach dem Gegenstand des logischen Schließens; diesen Gegenstand bilden die Aussagen.

Eine Aussage ist ein Gedanke, der einen Sachverhalt widerspiegelt. Dieser Gedanke hat die Form eines Satzes irgendeiner Sprache bzw. kann in diese Form gebracht werden und anderen Menschen mitgeteilt werden. Bei dieser Mitteilung nimmt also dieser Gedanke - die Aussage - die Form einer sprachlichen Erscheinung an, der ein bestimmter Sinn innewohnt.

Dieser Sinn - das Ausgesagte - bezieht sich auf die Realität, sagt etwas über die Realität aus, d. h. besagt, dass in der Realität ein gewisser Sachverhalt vorliegt. Wir wollen den Begriff der

Aussage so eng fassen, dass die Aussagen die Eigenschaft haben, entweder wahr oder falsch zu sein. Dieses Prinzip, das sogenannte Prinzip der Zweiwertigkeit, ist nicht denknotwendig, sondern beruht auf der Erfahrung, dass man alle Aussagen (insbesondere in der Mathematik) sprachlich so scharf formulieren kann, dass sie den auszusagenden Sachverhalt entweder genau treffen oder ihn verfehlen.

Wir sagen, eine Aussage ist wahr (bzw. ihr Wahrheitswert ist  $W$ ), wenn der ausgesagte Sachverhalt in der Realität vorliegt. Die Aussage "Es schneit" ist eine wahre Aussage dann und nur dann, wenn es gerade schneit. Wenn der von einer Aussage ausgesagte Sachverhalt nicht vorliegt, dann sagen wir, diese Aussage ist falsch (bzw. besitzt den Wahrheitswert  $F$ ).

In mittleren Breitengraden ist also die Aussage "Es schneit" im Sommer im allgemeinen falsch.

Das Wahr- bzw. Falschsein von Aussagen ist die einzige Eigenschaft von Aussagen, die wir in unserem Modell widerspiegeln. Wir beachten also nicht, dass es Aussagen über Vergangenes, Gegenwärtiges oder Zukünftiges gibt, dass man die Aussagen auch nach den Wissensgebieten, denen sie entstammen, in meteorologische, philosophische, physikalische usw. einteilen kann. Für uns ist im Augenblick nur wichtig, dass sie entweder falsch oder wahr sind. obwohl sich das z. B. bei der Aussage "Am 1. Januar des Jahres 2000 regnet es um 10 Uhr MEZ am Nordpol" erst in der Zukunft entscheidet oder z. B. bei der Aussage "Am 22. Januar 1802 war Schiller krank" vielleicht nicht mehr feststellen lässt.

Kommen wir nun zu Beziehungen zwischen Aussagen, die wir in unserem Modell widerspiegeln wollen. Mit Hilfe bestimmter Wörter, z. B. "nicht", "und", "oder", "wenn - so", "genau dann - wenn", "weil", "damit" können wir aus (sprachlich) gegebenen Aussagen neue (kompliziertere) Aussagen aufbauen.

So kann aus der Aussage "Es schneit" mit Hilfe von "nicht" die Negation dieser Aussage, nämlich die Aussage "Es schneit nicht" gewonnen werden. Wenn  $A$  eine Aussage ist, dann ist die Negation der Aussage  $A$  offenbar falsch, wenn  $A$  selbst wahr ist, und wahr, wenn  $A$  falsch ist. "Es schneit" ist genau dann wahr, wenn "Es schneit nicht" falsch ist.

Aus Aussagen  $A$ ,  $B$  kann mit dem Wort "und" die neue Aussage  $A$  und  $B$ , die Konjunktion der Aussagen  $A$ ,  $B$ , gebildet werden. Diese Konjunktion der beiden Aussagen  $A$ ,  $B$  ist dann und nur dann wahr, wenn sowohl  $A$  als auch  $B$  eine wahre Aussage ist.

Die Aussage "Es schneit und die Straße ist nass" ist also nur in dem Fall wahr, dass es schneit und die Straße nass ist.

Mit Hilfe des Wortes "oder" können wir aus Aussagen  $A$ ,  $B$  die Alternative  $A$  oder  $B$  bilden. Dabei benutzen wir das Wort "oder" im nichtausschließenden Sinn - die Alternative  $A$  oder  $B$  der Aussagen  $A$ ,  $B$  ist eine wahre Aussage genau dann, wenn  $A$  wahr ist oder  $B$  wahr ist oder beide Aussagen wahr sind.

$A$  oder  $B$  ist also nur dann falsch, wenn sowohl  $A$  als auch  $B$  falsche Aussagen sind. Die Aussage "Es regnet oder die Sonne scheint" ist also auch wahr, wenn es regnet und gleichzeitig die Sonne scheint.

Entsprechend können wir mittels der Wortkombination "wenn - so" aus Aussagen  $A$ ,  $B$  die Aussage wenn  $A$ , so  $B$ , die materiale Implikation von  $A$  und  $B$  konstruieren. Diese Aussage ist nur in dem Fall falsch, dass die Aussage  $A$  wahr, die Aussage  $B$  aber falsch ist.

Es ist klar, dass die Aussagenverbindung mit "wenn - so" in der Umgangssprache auf diese Weise gedeutet wird, aber dies ist nicht die einzige Deutung in der Umgangssprache.

Als Beispiel betrachten wir die Aussage "Wenn schönes Wetter ist, so gehe ich spazieren". In

der umgangssprachlichen Bedeutung von "wenn - so" wird man diese Aussage für wahr halten, wenn schönes Wetter ist und ich spazieren gehe, und für falsch, wenn schönes Wetter ist und ich nicht spazieren gehe.

Was aber, wenn kein schönes Wetter ist?

Nach unserer oben getroffenen Vereinbarung ist die Aussage "Wenn  $A$ , so  $B$ " wahr, wenn  $A$  falsch ist. Doch es erregt häufig Befremden, wenn man erklärt, dass die Aussage "Wenn schönes Wetter ist, so gehe ich spazieren" auch in dem Fall wahr ist, dass ich spazieren gehe, obwohl das Wetter nicht schön ist.

Näher auf den daraus entstehenden Streit, der vielfach aus Verwechslung der logischen materialen Implikation mit der kausalen (die Ursache - Wirkung - Relation beschreibenden) Implikation herrührt, einzugehen, ist hier nicht möglich.<sup>41</sup>

Es sei nur darauf hingewiesen, dass diese Festlegung der Implikation für die Mathematik und die mathematische Logik unerlässlich ist. Dazu ein Beispiel:

Für beliebige Zahlen  $a, b$  ist "Wenn  $a = b$ , so  $a^2 = b^2$ " eine wahre Aussage der Mathematik. Setzen wir speziell für  $a$  die Zahl  $+1$ , für  $b$  die Zahl  $-1$  ein, so ergibt sich die Aussage: "Wenn  $+1 = -1$ , so  $(+1)^2 = (-1)^2$ ". Diese Aussage ist wahr, denn sie bildet ja einen Spezialfall eines wahren Satzes der Mathematik, obwohl (oder gerade weil) die Aussage " $-1 = +1$ " natürlich falsch und die Aussage " $1=1$ " wahr ist.

Ganz analog kann man mit Hilfe der Wörter "genau dann, wenn", "weil", "damit" aus Aussagen  $A, B$  zusammengesetzte Aussagen " $A$  genau dann, wenn  $B$ ", " $A$  weil  $B$ ", " $A$  damit  $B$ " bilden. Die Aussage " $A$  genau dann, wenn  $B$ " ist offenbar dann und nur dann wahr, wenn die Aussagen  $A, B$  den gleichen Wahrheitswert besitzen, also beide wahr oder beide falsch sind. Über die Wahrheit bzw. Falschheit der Aussagen " $A$  weil  $B$ ", " $A$  damit  $B$ " können wir jedoch - wie man sich an Beispielen leicht überzeugt - allein auf Grund der Wahrheitswerte von  $A, B$  keine Aussagen machen.

Hier bemerken wir einen wichtigen Unterschied zwischen den Wörtern, die Aussagenfunktionen erzeugen, also Funktionen, die einer bestimmten Anzahl von Aussagen mit gegebener Reihenfolge eine neue Aussage zuordnen. Es gibt solche Wörter, bei denen der Wahrheitswert der zusammengesetzten Aussage allein durch die Wahrheitswerte ihrer Teile bestimmt ist - diese Aussagenverbindungen (bzw. Aussagenfunktionen) nennen wir extensional.

Die Aussagenverbindungen, bei denen der Wahrheitswert der zugeordneten Aussage nicht nur von den Wahrheitswerten der Komponenten abhängt, sondern von weiteren Eigenschaften der Komponenten, etwa dem Sinn dieser Aussagen, nennen wir intensional.

Wir können sie in unser Modell nicht aufnehmen, weil wir den Wahrheitswert als einzige Eigenschaft von Aussagen in unserem Modell widerspiegeln.

Die Extensionalität der klassischen Aussagenfunktionen "nicht", "und", "oder", "wenn - so", "genau dann, wenn" ermöglicht uns, eine wesentliche Vereinfachung vorzunehmen: Die Aussagen repräsentieren wir durch ihre Wahrheitswerte.

Der Wahrheitswert  $W$  steht dabei also für die Klasse aller wahren Aussagen. Von den Aussagenfunktionen gehen wir über zu entsprechenden Wahrheitsfunktionen, also zu Funktionen, die (wenn sie  $n$ -stellig sind,  $n \geq 1$ ) jedem  $n$ -Tupel von Wahrheitswerten wieder einen Wahrheitswert zuordnen.

Man kann sich überlegen, dass es (bei zwei Wahrheitswerten) zu jedem  $n$  genau  $2^{2^n}$  Wahr-

---

<sup>41</sup>Der interessierte Leser sei verwiesen auf: G. Klaus: Moderne Logik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1964, Kap. III.

heitsfunktionen gibt. Es gibt also vier einstellige Wahrheitsfunktionen  $\Phi_i^1$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), deren Werteverlauf aus folgender Tabelle zu entnehmen ist. Dabei bezeichnen wir mit  $w_1$  eine Variable für Wahrheitswerte.

$w_1$	$\Phi_1^1$	$\Phi_2^1$	$\Phi_3^1$	$\Phi_4^1$
W	W	W	F	F
F	W	F	W	F

Die Funktion  $\Phi_3^1$ , entspricht gerade der Negation, denn sie ordnet jedem Wahrheitswert  $w_1$  gerade jenen Wahrheitswert zu, den die Negation einer Aussage mit dem Wahrheitswert  $w_1$  hat. Diese Wahrheitsfunktion bezeichnen wir mit non.

Um den zweistelligen Aussagenfunktionen, die durch die Wörter "und", "oder", "wenn - so", "genau dann, wenn" vermittelt werden, Wahrheitsfunktionen zuzuordnen, betrachten wir die 16 zweistelligen Wahrheitsfunktionen:

$w_1$	$w_2$	$\Phi_1^2$	$\Phi_2^2$	$\Phi_3^2$	$\Phi_4^2$	$\Phi_5^2$	$\Phi_6^2$	$\Phi_7^2$	$\Phi_8^2$	$\Phi_9^2$	$\Phi_{10}^2$	$\Phi_{11}^2$	$\Phi_{12}^2$	$\Phi_{13}^2$	$\Phi_{14}^2$	$\Phi_{15}^2$	$\Phi_{16}^2$
W	W	W	W	W	W	W	W	W	F	F	F	F	F	F	F	F	F
W	F	W	W	W	W	F	F	F	F	W	W	W	W	F	F	F	F
F	W	W	W	F	F	W	W	F	F	W	W	F	F	W	W	F	F
F	F	W	F	W	F	W	F	W	F	W	F	W	F	W	F	W	F

Man kann sich leicht überlegen, dass die Funktion  $\Phi_2^2$  - die wir mit vel bezeichnen - der Aussagenverbindung "oder" entspricht, die Funktion  $\Phi_5^2$  - genannt seq - der Aussagenverbindung "wenn - so" entspricht, dass ferner  $\Phi_8^2$  - genannt et - der Konjunktion und  $\Phi_7^2$  - genannt aeq - der Aussagenverbindung "genau dann, wenn" entspricht.

Wir erwähnen noch, dass die Funktion  $\Phi_{10}^2$  - aut genannt - gerade der "Entweder -oder"-Verbindung von Aussagen zugeordnet ist.

Die Wahrheitsfunktion  $\Phi_9^2$  - bezeichnet durch she - heißt Sheffersche Funktion, und die Funktion  $\Phi_{15}^2$  - bezeichnet durch nic - wird Nicodsche Funktion genannt. (Diese Funktion entspricht offenbar der Aussagenverbindung mit "weder - noch").

Auf die Bedeutung dieser Funktionen kommen wir unten zurück. Die Funktionen non, et, vel, seq, aeq bezeichnet man auch als die klassischen (zweiwertigen) Wahrheitsfunktionen.

Wir haben damit den Bereich des logischen Schließens umrissen, den wir durch ein abstraktes Modell widerspiegeln wollen, nämlich die sogenannte Aussagenlogik, und können nun darangehen, dieses Modell - das wir Aussagenkalkül nennen wollen - aufzubauen. Zur Angabe irgend eines beliebigen Modells gehört Zunächst die Beschreibung der Elemente des Modells.

In unserem Fall sind das Zeichen und Zeichenreihen, nämlich die Zeichen  $p, q, r, p_1, p_2, \dots$ , die wir Variable für Wahrheitswerte nennen, ferner die Zeichen  $\sim, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$ , die wir Funktoren (Funktionszeichen) nennen und als Zeichen für die klassischen Wahrheitsfunktionen verwenden, sowie die "technischen" Zeichen  $(, )$ , und die mit diesen Zeichen gebildeten Zeichenreihen endlicher Länge.

Eine derartige Zeichenreihe ist zum Beispiel  $p \rightarrow \wedge qq$ , eine andere  $(, \dots$ , ferner ist  $p_{27}(\rightarrow$  eine Zeichenreihe usw. Unter diesen Grundelementen unseres Modells sondern wir nun diejenigen aus, denen bei der Interpretation des Modells, d. h. der Rückübersetzung der Modelleigenschaften in die Aussagenlogik, die wir ja modellieren wollen, ein Sinn zukommt. Diese Modellelemente (Zeichenreihen) nennen wir Ausdrücke. Wir definieren:

1. Die Zeichenreihen  $p, q, r, p_1, p_2, \dots$  sind Ausdrücke.

2. Wenn die Zeichenreihen  $Z_1, Z_2$  Ausdrücke sind, dann sind auch die folgenden Zeichenreihen

Ausdrücke:

$$\sim Z_1, \sim Z_2, (Z_1 \wedge Z_2), (Z_1 \vee Z_2), (Z_1 \rightarrow Z_2), (Z_1 \leftrightarrow Z_2)$$

3. Eine Zeichenreihe ist nur dann ein Ausdruck, wenn sie zu den unter 1. genannten Ausdrücken gehört oder in einer unter 2. angegebenen Weise aus schon als Ausdrücke erkannten Zeichenreihen aufgebaut werden kann.

Also ist die Zeichenreihe  $(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$  ein Ausdruck, denn nach 1. sind  $p$  und  $q$  Ausdrücke, also nach 2. auch  $(p \rightarrow q)$ . Da  $p$  und  $(p \rightarrow q)$  Ausdrücke sind, ist auch  $(p \wedge (p \rightarrow q))$  ein Ausdruck und damit auch  $((p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q)$ .

Zu den wichtigsten Eigenschaften der Ausdrücke gehört es, bei einer gegebenen Verteilung von Wahrheitswerten auf die Variablen einen bestimmten Wahrheitswert anzunehmen. Wir wollen nun angeben, wie dieser Wahrheitswert bestimmt wird.

Es sei  $f$  eine Funktion, die jeder Variablen  $p, q, r, p_1, p_2, \dots$  einen der beiden Wahrheitswerte  $W, F$  zuordnet. Derartige Funktionen nennen wir Belegungen.

Der Wahrheitswert eines Ausdrucks wird in der gleichen Weise definiert, wie wir den Begriff "Ausdruck" festgelegt haben, d. h., wir setzen fest, welchen Wahrheitswert die unter 1. genannten Ausdrücke bei einer gegebenen Belegung  $f$  haben und legen dann fest, wie der Wahrheitswert zusammengesetzter Ausdrücke aus den Wahrheitswerten ihrer Komponenten bestimmt wird.

Für einen gegebenen Ausdruck  $\mathbf{H}$  und eine gegebene Belegung  $f$  bezeichnen wir den Wahrheitswert des Ausdrucks  $\mathbf{H}$  bei der Belegung  $f$  mit  $\text{Wert}(\mathbf{H}, f)$ . Wir definieren:

a)  $\text{Wert}(p, f) = f(p), \text{Wert}(q, f) = f(q), \text{Wert}(r, f) = f(r), \text{Wert}(p_i) = f(p_i) (i = 1, 2, \dots);$

b) Es seien  $\mathbf{H}, \mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  Ausdrücke:

$$\begin{aligned} \text{Wert}(\sim \mathbf{H}, f) &= \text{non}(\text{Wert}(\mathbf{H}, f)) \\ \text{Wert}((\mathbf{H}_1 \wedge \mathbf{H}_2), f) &= \text{et}(\text{Wert}(\mathbf{H}_1, f), \text{Wert}(\mathbf{H}_2, f)) \\ \text{Wert}((\mathbf{H}_1 \vee \mathbf{H}_2), f) &= \text{vel}(\text{Wert}(\mathbf{H}_1, f), \text{Wert}(\mathbf{H}_2, f)) \\ \text{Wert}((\mathbf{H}_1 \rightarrow \mathbf{H}_2), f) &= \text{seq}(\text{Wert}(\mathbf{H}_1, f), \text{Wert}(\mathbf{H}_2, f)) \\ \text{Wert}((\mathbf{H}_1 \leftrightarrow \mathbf{H}_2), f) &= \text{aeq}(\text{Wert}(\mathbf{H}_1, f), \text{Wert}(\mathbf{H}_2, f)) \end{aligned}$$

Aus dieser Definition ergibt sich, dass der Wahrheitswert eines beliebigen Ausdrucks  $\mathbf{H}$  nur von der Belegung derjenigen Variablen abhängt, die in  $\mathbf{H}$  vorkommen. Wenn also  $f, f'$  Belegungen sind, die für alle in  $\mathbf{H}$  vorkommenden Variablen übereinstimmen, dann ist

$$\text{Wert}(\mathbf{H}, f) = \text{Wert}(\mathbf{H}, f')$$

Wenn wir den Wahrheitswert eines Ausdrucks  $\mathbf{H}$  bei einer Belegung  $f$  berechnen wollen, so brauchen wir die Werte von  $f$  also nur für jene Variablen zu kennen, die in  $\mathbf{H}$  vorkommen.

Als Beispiel bestimmen wir den Wahrheitswert des Ausdrucks  $\mathbf{H}^* \equiv ((p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q)$  bei allen möglichen Belegungen, d. h. bei allen möglichen Belegungen der beiden einzigen vorkommenden Variablen  $p$  und  $q$ . Dazu müssen wir zunächst die Wahrheitswerte der Teilausdrücke bestimmen und auf diesen aufbauend den Wahrheitswert des Gesamtausdrucks. Wir geben diese Berechnung in Form einer Tabelle wieder:

$f : p$	$q$	$\text{Wert}((p \rightarrow q), f)$	$\text{Wert}((p \wedge (p \rightarrow q)), f)$	$\text{Wert}(\mathbf{H}^*, f)$
W	W	W	W	W
W	F	F	F	W
F	W	W	F	W
F	F	W	F	W

Unser Ergebnis ist, dass der Ausdruck  $\mathbf{H}^*$  bei jeder Belegung den Wahrheitswert  $W$  hat. Derartige Ausdrücke heißen gültig (oder auch allgemeingültig) oder auch Sätze des Aussagenkalküls.

Bevor wir weitere Eigenschaften der Elemente unseres Modells und Beziehungen zwischen diesen Elementen erörtern, erscheint es angebracht, zunächst unser Modell zu interpretieren und festzustellen, welche Eigenschaft des modellierten Objekts der Allgemeingültigkeit (im Modell) entspricht.

Das zu modellierende Objekt ist die Aussagenlogik, ihre Elemente sind die Aussagen und Aussagenverbindungen (Aussagenfunktionen), also Funktionen, die Aussagen oder Paaren (allgemein:  $n$ -Tupeln) von Aussagen wieder Aussagen zuordnen. Bei der Konstruktion des Modells waren wir von den Aussagen zu ihren Wahrheitswerten und von den Aussagenfunktionen zu Wahrheitsfunktionen übergegangen - bei der Interpretation des Modells müssen wir den umgekehrten Weg gehen.

Betrachten wir also die Variablen  $p, q$  usw. für Wahrheitswerte als Variable für Aussagen, das Zeichen  $\sim$  als Bezeichnung für die Negation,  $\wedge$  als Zeichen für die Konjunktion,  $\vee$  als Zeichen für die Alternative,  $\rightarrow$  als Zeichen für die materiale Implikation und  $\leftrightarrow$  als Zeichen für die Aussagenfunktion "genau dann, wenn" (auch Äquivalenz genannt), so interpretieren wir den Aussagenkalkül gerade in der Weise, die wir bei seiner Konstruktion beabsichtigt haben.

Bei dieser Interpretation des Aussagenkalküls sind den Ausdrücken gerade extensionale Aussagenverbindungen (extensionale Aussagenfunktionen) zugeordnet, zum Beispiel entspricht dem Ausdruck  $(p \vee q) \rightarrow r$  die Aussagenfunktion, die jedem Tripel  $[A, B, C]$  von Aussagen die Aussage "Wenn  $A$  oder  $B$ , so  $C$ " zuordnet.

Ist  $A$  die Aussage "Es regnet",  $B$  die Aussage "Es schneit",  $C$  die Aussage "Es ist schlechtes Wetter", dann ordnet diese Aussagenfunktion dem Tripel  $[A, B, C]$  die Aussage "Wenn es regnet oder schneit, so ist schlechtes Wetter" zu.

Ein wesentliches Ergebnis, das sich beim Studium unseres Modells ergibt, besagt, dass jede extensionale Aussagenfunktion durch einen Ausdruck des Aussagenkalküls widergespiegelt wird. Das heißt mit anderen Worten:

Obwohl wir unser Modell nur mit Hilfe der klassischen Aussagenfunktionen (einer einstelligen und vier zweistelligen) konstruiert haben, lassen sich alle extensionalen Aussagenfunktionen (beliebiger Stellenzahl  $n$ ) in diesem Modell darstellen. Darüber hinaus kann man sogar bereits mit zwei der klassischen Aussagenfunktionen auskommen, z. B. mit Negation und Alternative oder mit Negation und Konjunktion oder mit Negation und Implikation.

Mit einer der klassischen Aussagenfunktionen allein kann man jedoch kein Modell aufbauen, in dem alle extensionalen Aussagenfunktionen darstellbar sind. Es ist auch unmöglich, ein solches Modell auf der Basis irgendeiner einzelnen einstelligen Aussagenfunktion zu errichten. Es gibt jedoch genau zwei zweistellige Aussagenfunktionen, mit deren Hilfe sich jede Aussagenfunktion darstellen lässt, nämlich die Aussagenfunktion "weder - noch", der als Wahrheitsfunktion die Nicodsche Funktion zugeordnet ist, und jene Aussagenfunktion, der die Sheffersche Wahrheitsfunktion entspricht.

Welche Eigenschaft der den Ausdrücken zugeordneten Aussagenfunktionen (die übrigens genau  $n$  Stellen hat, dann und nur dann, wenn in dem Ausdruck  $n$  verschiedene Variablen vorkommen) entspricht nun der Eigenschaft von Ausdrücken, in unserem Modell allgemeingültig zu sein? Offenbar die Eigenschaft, jedem  $n$ -Tupel von Aussagen stets eine wahre Aussage zuzuordnen; das heißt eine Aussage, die allein auf Grund ihrer Struktur wahr ist, wie z. B. eine Aussage der Form " $A$  oder nicht  $A$ ", die von der dem allgemeingültigen Ausdruck  $p \vee \sim p$

entsprechenden einstelligen Aussagenfunktion geliefert wird.

Aussagenfunktionen, die jedem  $n$ -Tupel von Aussagen ( $n$  ihre Stellenzahl) eine wahre Aussage zuordnen, heißen Tautologien. Unser Modell ermöglicht also ein eingehendes Studium der Tautologien.

Diesem Studium ordnet sich auch die Frage nach der logischen Gleichwertigkeit von Aussagenfunktionen unter. Zwei Aussagenfunktionen  $\alpha, \beta$  gleicher Stellenzahl  $n$  heißen logisch gleichwertig genau dann, wenn der Wahrheitswert der Aussage  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  bei jedem  $n$ -Tupel  $[A_1, A_2, \dots, A_n]$  von Aussagen mit dem Wahrheitswert der Aussage  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n)$  übereinstimmt.

Das ist, wie man sich überlegen kann, aber dann und nur dann der Fall, wenn die Aussagenfunktion

" $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  genau dann, wenn  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n)$ "

eine Tautologie ist.

Wir wenden uns nun wieder unserem Modell zu und fragen: Was entspricht der logischen Gleichwertigkeit von Aussagenfunktionen in unserem Modell?

Beim Übergang von der Aussagenlogik zu unserem Modell, dem Aussagenkalkül, werden die Aussagenfunktionen durch Ausdrücke ersetzt - die Aussagenfunktion

" $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  genau dann, wenn  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n)$ "

geht dabei in einen Ausdruck der Form  $(\mathbf{H}_1 \leftrightarrow \mathbf{H}_2)$  über, wobei  $\mathbf{H}_1$  und  $\mathbf{H}_2$  Ausdrücke sind, in denen genau  $n$  verschiedene Variablen vorkommen, und  $\mathbf{H}_1$  der Aussagenfunktion  $\alpha$ ,  $\mathbf{H}_2$  der Funktion  $\beta$  entspricht. Die Aussagenfunktion

" $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  genau dann, wenn  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n)$ "

ist offenbar genau dann eine Tautologie, wenn  $(\mathbf{H}_1 \leftrightarrow \mathbf{H}_2)$  allgemeingültig ist.

Dafür sagen wir auch, die Ausdrücke  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  sind semantisch äquivalent. Der logischen Gleichwertigkeit von Aussagenfunktionen entspricht also die semantische Äquivalenz der entsprechenden Ausdrücke.

Dem Studium der Tautologien ordnet sich auch das Studium der aussagenlogischen Schlussregeln unter. Eine (aussagenlogische) Schlussregel ist ein Satz der Form:

"Wenn die Aussage  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  wahr ist, so ist auch die Aussage  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$  wahr"

der für beliebige Aussagen  $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m}$  wahr ist. (Dabei sind  $n, m$  natürliche Zahlen mit  $n \geq 1, m \geq 0$ ,  $\alpha$  ist eine  $n$ -stellige Aussagenfunktion,  $\beta$   $n + m$ -stellige Aussagenfunktion, die aber nicht von allen Argumentstellen abzuhängen braucht.)

Zwei Beispiele für Schlussregeln:

"Wenn die Aussagen  $A_1$  und (wenn  $A_1$ , so  $A_2$ ) wahr sind, so ist auch die Aussage  $A_2$  wahr."

"Wenn die Aussage  $A_1$  wahr ist, so ist auch die Aussage  $A_1$  oder  $A_2$  wahr."

Nach der letzten dieser Schlussregeln kann man also aus der Wahrheit der Aussage "es schneit" schließen, dass die Aussage "es schneit oder es regnet" wahr ist. Der Satz

"Wenn die Aussage  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  wahr ist, so ist auch die Aussage  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$  wahr"



sei eine Schlussregel. Wir betrachten die Aussagenfunktion

"Wenn  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$ , so  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$ "

Diese Aussagenfunktion liefert für beliebige Aussagen  $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m}$  dann eine wahre Aussage, wenn  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  wahr ist, weil der angegebene Satz eine Schlussregel ist.

Ist nun  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  falsch, so liefert diese Aussagenfunktion ebenfalls eine wahre Aussage, nämlich auf Grund der Definition der Implikation! Ist der Satz eine Schlussregel, dann ist also die zugehörige Aussagenfunktion eine Tautologie.

Es sei umgekehrt die Aussagenfunktion

"Wenn  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$ , so  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$ "

eine Tautologie.

Nach Definition der Implikation ist diese bei wahren Vorderglied  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  nur dann wahr, wenn auch das Hinterglied  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$  wahr ist. Also ist der Satz

"Wenn die Aussage  $\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n)$  wahr ist, so ist die Aussage  $\beta(A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, \dots, A_{n+m})$  wahr"

eine Schlussregel. Man kann also aus jeder Tautologie, bei der die Implikation "Hauptverknüpfung" ist, eine Schlussregel erhalten.

Eine Übersicht über alle Tautologien zu erlangen, ist daher von höchster Wichtigkeit. Diese Übersicht erlangen wir, wenn wir die allgemeingültigen Ausdrücke des Modells beherrschen, denn - wie wir gesehen haben - entspricht jedem allgemeingültigen Ausdruck eine Tautologie und umgekehrt.

Daher besitzt die Tatsache, dass man entscheiden kann, ob ein gegebener Ausdruck allgemeingültig ist oder nicht, eine große Bedeutung. "Man kann entscheiden" - das bedeutet, dass es ein allgemeines Verfahren gibt, das in gleicher Weise auf jeden Ausdruck angewandt werden kann und nach endlich vielen Schritten entweder zu dem Resultat:

"Der vorgelegte Ausdruck ist allgemeingültig" oder zu dem Resultat: "Der vorgelegte Ausdruck ist nicht allgemeingültig" kommt.

Ein derartiges Verfahren kann stets von einer Turing-Maschine durchgeführt werden.

Dieses Verfahren ist im Prinzip sehr einfach. Wenn der gegebene Ausdruck genau  $n$  Variablen enthält, dann braucht man - wie wir uns früher schon einmal überlegt haben - nur die Belegungen dieser  $n$  Variablen zu betrachten, weil eine Belegung der übrigen Variablen keinen Einfluss auf seinen Wahrheitswert hat. Bei  $n$  Variablen gibt es genau  $2^n$  verschiedene Belegungen, diese probiert man durch, und wenn der Ausdruck bei keiner dieser Belegungen den Wahrheitswert F annimmt, dann und nur dann ist er allgemeingültig.

Wenn man also einen Satz der angegebenen Form daraufhin prüfen will, ob er eine (aussagenlogische) Schlussregel ist, dann hat man nur die entsprechende Aussagenfunktion daraufhin zu prüfen, ob sie eine Tautologie ist, d. h., man muss feststellen, ob der entsprechende Ausdruck allgemeingültig ist.

Dieses Verfahren erläutern wir am sogenannten "bayrischen" Trugschluss:

Saufst, sterbst; saufst net, sterbst a. Saufst.

Die allgemeine Form dieses Trugschlusses lautet:

"Wenn die Aussagen (Wenn  $A_1$ , so  $A_2$ ) und (Wenn nicht  $A_1$  so  $A_2$ ) wahr sind, dann ist die

Aussage  $A_1$  wahr."

Die entsprechende Aussagenfunktion ist:

Wenn [(Wenn  $A_1$ , so  $A_2$ ) und (Wenn nicht  $A_1$  so  $A_2$ )], so  $A_1$ . Ein zugehöriger Ausdruck des Aussagenkalküls ist offenbar: (die Bezeichnung der Variablen ist beliebig - daher gibt es mehrere)

$$\mathbf{H}^{**} \equiv (((p \rightarrow q) \wedge (\sim p \rightarrow q)) \rightarrow p)$$

Wir prüfen nun, ob dieser Ausdruck allgemeingültig ist. Die Ergebnisse, die wir beim Durchprobieren der Belegungen erhalten, sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

$f : p$	$q$	$((p \rightarrow q), f)$	$((\sim p \rightarrow q), f)$	$((p \rightarrow q) \wedge (\sim p \rightarrow q), f)$	$(\mathbf{H}^{**}, f)$
W	W	W	W	W	W
W	F	F	W	F	W
F	W	W	W	W	F
F	F	W	F	F	W

Der Ausdruck  $\mathbf{H}^{**}$  ist also nicht allgemeingültig, folglich ist der untersuchte Satz keine Schlussregel, sondern wirklich ein Trugschluss. Eine Schlussregel ist dagegen

"Wenn die Aussagen (wenn  $A_1$ , so  $A_2$ ) und (wenn nicht  $A_1$  so  $A_2$ ) wahr sind, dann ist die Aussage  $A_2$  wahr"

da der entsprechende Ausdruck  $((p \rightarrow q) \wedge (\sim p \rightarrow q)) \rightarrow q$  allgemeingültig ist.

Unser Modell besitzt also sehr wichtige Eigenschaften. Es würde zu weit führen, hier alle Eigenschaften des Aussagenkalküls zu diskutieren. Wir wollen nur darauf aufmerksam machen, dass auch die Schlussregeln der Aussagenlogik formalisiert, d. h. in das Modell übertragen werden können - ihnen entsprechen die sogenannten Ableitungsregeln.

Das sind Regeln, die sich nur auf die zeichentheoretische Struktur von Ausdrücken beziehen und es ermöglichen, von gewissen Ausdrücken zu anderen Ausdrücken überzugehen. Diese Regeln sind so beschaffen, dass sich bei diesem Übergang die Allgemeingültigkeit "vererbt", d. h., wenn die Ausgangsausdrücke allgemeingültig sind, so besitzt auch jeder davon abgeleitete Ausdruck diese Eigenschaft. Eine solche Ableitungsregel lautet:

"Wenn der Ausdruck  $\mathbf{H}$  ableitbar ist, dann ist auch der Ausdruck  $(\mathbf{H} \vee \mathbf{H}_1)$  ableitbar" (wobei  $\mathbf{H}_1$  ein beliebiger Ausdruck ist). Man sieht leicht ein, dass diese Regel die Allgemeingültigkeit vererbt.

Aus gewissen (allgemeingültigen) a priori ableitbaren Ausdrücken (den Axiomen) lassen sich dann mit Hilfe von nur zwei Ableitungsregeln alle allgemeingültigen Ausdrücke ableiten.<sup>42</sup>

Wir haben damit ein formales System erhalten, dessen Elemente (die Ausdrücke) aus bestimmten Zeichen nach gewissen Konstruktionsregeln aufgebaut sind. Gewisse Elemente des formalen Systems werden als Axiome ausgezeichnet. Mit Hilfe von (rein strukturellen) Ableitungsregeln werden aus Axiomen und schon abgeleiteten Ausdrücken andere Ausdrücke abgeleitet, d. h. als ableitbar erkannt.

Wenn wir den Zeichen des gegebenen formalen Systems - das Kalkül genannt wird - in der beschriebenen Weise Bedeutungen zuordnen (oder wie man sagt - den Kalkül interpretieren), d. h. also die Variablen  $p, q, \dots$  als Variable für die Wahrheitswerte W, F und die Funktoren  $\sim, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$  als Zeichen für die Wahrheitsfunktionen non, et, nel, seq, aeq auffassen, so

<sup>42</sup>Eine exakte Darstellung des Aussagenkalküls findet der interessierte Leser in: G. Asser: Einführung in die mathematische Logik, Bd. I, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig.

erhalten wir den Aussagenkalkül.

Dabei entspricht (bei passender Wahl der Axiome und Ableitungsregeln) der Kalküleigenschaft von Ausdrücken, ableitbar zu sein, gerade die Modelleigenschaft von Ausdrücken, allgemeingültig zu sein.

Mit dieser Bemerkung schließen wir die Diskussion der Eigenschaften unseres Modells ab und wenden uns einigen Anwendungen des Aussagenkalküls zu, die über die ursprünglich beabsichtigten hinausgehen. Es sei hier noch erwähnt, dass wir unseren Kalkül natürlich auch anders interpretieren können. So entsteht bei einer passenden Deutung der Kalkülelemente (Zeichen und Ausdrücke) die Mengenalgebra (auch Boolesche Algebra genannt).

Wir wollen nun den Aussagenkalkül zur Beschreibung elektrischer Schaltungen, und zwar der sogenannten Reihenparallelschaltungen, verwenden.

Eine Reihenparallelschaltung baut sich aus Kontakten (Schaltern) auf, die von gewissen Arbeitselementen betätigt werden. Welcher Art diese Arbeitselemente sind, lassen wir offen; gewöhnliche elektromagnetische Relais sind Beispiele für derartige Elemente.

Jedes Arbeitselement betätigt eine Reihe von Kontakten, zum einen Arbeitskontakte (Symbol  $\text{---}\diagup\text{---}$ ), die geöffnet sind, wenn das Arbeitselement in Ruhe ist (kein Strom durch die Relaispule fließt), und geschlossen sind, wenn das Arbeitselement aktiv ist (ein hinreichend starker Strom durch die Spule fließt), und zum anderen Ruhekontakte (Symbol:  $\text{---}\diagdown\text{---}$ ) die sich genau entgegengesetzt verhalten, also geschlossen sind, wenn das Arbeitselement in Ruhe ist, und geöffnet, wenn das Arbeitselement aktiv ist.

Ein Ruhekontakt und ein Arbeitskontakt, die von dem gleichen Arbeitselement betätigt werden, sind also niemals gleichzeitig geöffnet oder gleichzeitig geschlossen.

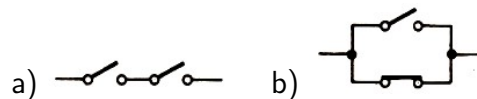


Bild 10.1.: a) Reihenschaltung zweier Arbeitskontakte; b) Parallelschaltung eines Arbeits- und eines Ruhekontaktes.

Jede Reihenparallelschaltung besitzt zwei nach außen führende Leitungen, die wir Anschlüsse nennen. Das "In-Reihe-Schalten" zweier Schaltungen besteht darin, dass ein Anschluss der einen Schaltung mit einem Anschluss der anderen Schaltung (leitend) verbunden wird. Die beiden frei bleibenden Anschlüsse sind die Anschlüsse der Gesamtschaltung.

Beim "Parallelschalten" zweier Schaltungen werden die beiden Anschlüsse der einen Schaltung mit den beiden Anschlüssen der anderen Schaltung durch insgesamt zwei Verbindungen verknüpft. Von den beiden Verbindungsstellen zweier Anschlüsse wird je eine Leitung nach außen geführt - diese Leitungen sind die Anschlüsse der Gesamtschaltung.

Eine Schaltung (aus endlich vielen Kontakten) ist eine Reihenparallelschaltung, wenn sie nach folgenden Regeln konstruiert werden kann:

1. Jeder Kontakt ist eine Reihenparallelschaltung;
2. zwei in Reihe oder parallel geschaltete Reihenparallelschaltungen bilden wieder eine Reihenparallelschaltung.

Wir können nun jeder Reihenparallelschaltung  $S$  umkehrbar eindeutig einen Ausdruck  $\mathbf{H}_S$  des Aussagenkalküls zuordnen. Dazu ordnen wir zunächst den Arbeitselementen umkehrbar eindeutig Variablen zu. Damit sind auch den Kontakten eindeutig Variablen zugeordnet; jedem Kontakt entspricht nämlich die Variable, die jenem Arbeitselement zugeordnet ist, das diesen

Kontakt betätigt.

Besteht die Schaltung  $S$  aus genau einem Kontakt, dem etwa die Variable  $p$  entspricht, dann ist der  $S$  zugeordnete Ausdruck gerade  $p$ , wenn es sich um einen Arbeitskontakt handelt, und  $\sim p$ , wenn es sich um einen Ruhekontakt handelt.

Ist  $S$  eine Reihenschaltung (bzw. Parallelschaltung) zweier Schaltungen  $S_1, S_2$ , denen die Ausdrücke  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  zugeordnet sind, dann gehört zu  $S$  der Ausdruck  $(\mathbf{H}_1 \wedge \mathbf{H}_2)$  [bzw.  $(\mathbf{H}_1 \vee \mathbf{H}_2)$ ].

Betrachten wir als Beispiel die folgende Schaltung:

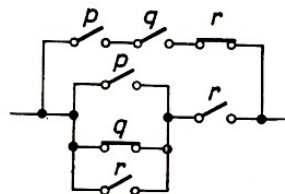


Bild 10.2.:

Dabei ist an den Kontakten die entsprechende Variable vermerkt. Diese Schaltung ist eine Parallelschaltung zweier Schaltungen, nämlich einer Reihenschaltung von drei Kontakten und einer Reihenschaltung von einem Kontakt mit einer Parallelschaltung von drei Kontakten.

Der Reihenschaltung von drei Kontakten (oberer Zweig) entspricht der Ausdruck  $((p \wedge q) \wedge \sim r)$ , der Parallelschaltung im unteren Zweig entspricht der Ausdruck  $((p \vee \sim q) \vee r)$ , insgesamt ist der Schaltung also der Ausdruck

$$(((p \wedge q) \wedge \sim r) \vee (((p \vee \sim q) \vee r) \wedge r))$$

zugeordnet.

Nach diesem Verfahren wird jeder Reihenparallelschaltung ein Ausdruck zugeordnet, in dem nur die Zeichen  $\wedge, \vee, \sim$  vorkommen, wobei das Zeichen  $\sim$  nur direkt vor Variablen steht. Umgekehrt ist jedem Ausdruck eine Reihenparallelschaltung zugeordnet.

Eine Schaltstellung einer Schaltung  $S$  ist gegeben, wenn wir die Zustände (in Ruhe oder aktiv) aller Arbeitselemente kennen, denn aus diesen Zuständen bestimmen sich ja die Stellungen der Kontakte. Jeder Schaltstellung einer Schaltung  $S$  ordnen wir umkehrbar eindeutig eine Belegung der Variablen zu, die in dem diese Schaltung beschreibenden Ausdruck vorkommen: Jede Variable, zu der ein Arbeitselement gehört, das bei der gegebenen Schaltstellung aktiv ist, erhält den Wahrheitswert W, die anderen Variablen werden mit F belegt.

Wesentlich für die Verwendung des Ausdrucks  $\mathbf{H}_S$  bei der Analyse und Synthese von Schaltungen ist die folgende Eigenschaft: Der Ausdruck  $\mathbf{H}_S$ , der der Schaltung  $S$  entspricht, nimmt für alle solche und nur für solche Belegungen  $f_i$  der in ihm vorkommenden Variablen den Wert W an, die einer Schaltstellung entsprechen, bei der die Schaltung  $S$  "durchlässig" ist.

"Durchlässig" bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine leitende Verbindung zwischen beiden Anschlüssen besteht.

Weil diese Tatsache relativ einfach einzusehen ist, wollen wir sie hier nicht beweisen, sondern nur an unserem Beispiel nachprüfen. Der Ausdruck

$$(((p \wedge q) \wedge \sim r) \vee (((p \vee \sim q) \vee r) \wedge r))$$

nimmt genau bei den in der folgenden Tabelle zusammengefassten Belegungen  $f_i$  den Wert W an:

	$p$	$q$	$r$
$f_1$	W	W	F
$f_2$	W	W	W
$f_3$	W	F	W
$f_4$	F	W	W
$f_5$	F	F	W

Es ist leicht einzusehen, dass unsere Schaltung bei den diesen Belegungen entsprechenden Schaltstellungen durchlässig ist, aber auch nur bei diesen Schaltstellungen.

Der Belegung  $f_1$  entspricht z. B. jene Schaltstellung, bei der die den Variablen  $p$  und  $q$  zugeordneten Arbeitselemente aktiv sind und das der Variablen  $r$  zugeordnete Arbeitselemente ruhig ist. Daher sind bei dieser Schaltstellung alle mit  $p$  oder  $q$  bezeichneten Arbeitskontakte und alle mit  $r$  markierten Ruhekontakte geschlossen, d. h., über den oberen Zweig der Schaltung besteht eine leitende Verbindung.

Zwei Schaltungen heißen elektrisch gleichwertig, wenn sie bei jeder Schaltstellung entweder beide durchlässig oder beide nicht durchlässig sind. Dieser Beziehung zwischen Reihenparallelschaltungen  $S_1, S_2$  entspricht die semantische Äquivalenz der zugeordneten Ausdrücke  $\mathbf{H}_{S_1}, \mathbf{H}_{S_2}$ , d. h., zwei Schaltungen  $S_1, S_2$  sind genau dann elektrisch gleichwertig, wenn der Ausdruck  $(\mathbf{H}_{S_1} \leftrightarrow \mathbf{H}_{S_2})$  allgemeingültig ist.

Diese Tatsache benutzt man bei der Vereinfachung von Schaltungen. Eine Überprüfung ergibt, dass unser Ausdruck mit dem Ausdruck  $((p \wedge q) \vee r)$  semantisch äquivalent ist, d. h., dass der Ausdruck

$$(((p \wedge q) \wedge \sim r) \vee (((p \vee \sim q) \vee r) \wedge r)) \leftrightarrow ((p \wedge q) \vee r)$$

bei jeder Belegung  $f$  der Variablen  $p, q, r$  den Wert W annimmt. Daher ist unsere Schaltung mit der Schaltung

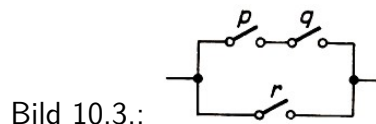


Bild 10.3.:

elektrisch gleichwertig.

In der Schaltalgebra, wie diese Anwendung des Aussagenkalküls auf die Theorie der elektrischen Schaltungen genannt wird, sind komplizierte Verfahren zur Analyse, Synthese und Minimalisierung von elektrischen Schaltungen entwickelt werden (und werden weitere entwickelt), die sich nicht auf die - hier nur der Einfachheit halber - behandelten Reihenparallelschaltungen beschränken. Diese Verfahren sind von großer Bedeutung für die Konstruktion von Rechenautomaten.

Es sei hier nur kurz angemerkt, dass die Funktionsweise der digitalen Rechenautomaten darauf beruht, dass sich das Rechnen mit Zahlen auf extensionale aussagenlogische Umformungen von Kodewörtern eines Binärkodes (z. B. dem Dualsystem), in dem die Zahlen im Automaten dargestellt sind, reduzieren lässt. Als Folge der Extensionalität dieser Umformungen braucht der Automat nicht zu "wissen", was er eigentlich tut. Er nimmt "stumpfsinnig" Umformungen an Kodewörtern vor und löst dabei arithmetische Aufgaben.

Durch die Ergebnisse neurophysiologischer Untersuchungen wurde der Gedanke nahegelegt, dass auch die Bausteine des menschlichen Nervensystems, die Neuronen, logische Umformungen von Signalen durchführen, die mit den Mitteln des Aussagenkalküls beschrieben werden

können. Warren McCulloch und Walter Pitts gaben 1943 mit ihrer Arbeit "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity" (Ein logischer Kalkül der Prinzipien der Nerventätigkeit) den Anstoß für die Theorie der sogenannten Nervennetze, die durch die Arbeiten von Kleene u. a. auch Bedeutung für die Automatentheorie gewann.

Neurophysiologen hatten auf Grund von Experimenten angenommen, dass die Neuronen nur zwei Erregungszustände kennen - sie sind entweder ruhig oder vollständig erregt (chemoelektrisch aktiv). Ihre Erregung pflanzt sich als elektrischer Impuls längs ihres Axons fort bis zu den Endknoten, die jedes Axon abschließen und mit denen das Soma eines anderen Neurons an einer Stelle, die Synapse heißt, berührt wird.

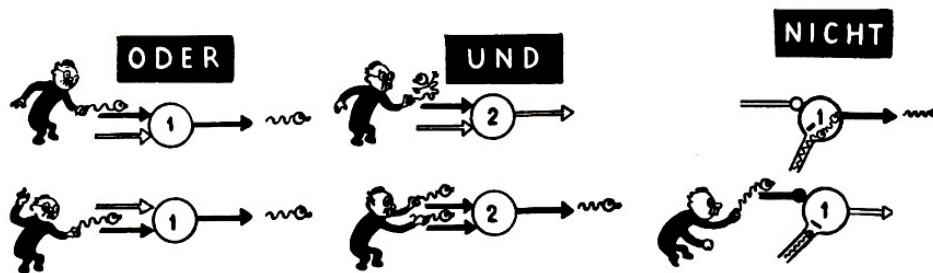


Bild 10.4.: So stellt man die "abstrakten Neuronen" der im Text erwähnten Typen dar, die die Verknüpfungen "oder", "und" und "nicht" realisieren.

Ob ein Neuron erregt wird oder nicht (ruhig ist), hängt nur davon ab, welche und wieviel Endknoten an seinen Synapsen (von anderen Neuronen) erregt werden. Gewisse Endknoten besitzen dabei eine Art "Vetorecht" - wenn sie erregt sind, kann das Neuron nicht erregt werden. Solche Endknoten nennt man hemmende Endknoten, die übrigen treibende Endknoten.

Jedes Neuron besitzt einen gewissen Schwellenwert - eine positive ganze Zahl, die angibt, wie viele treibende Endknoten mindestens erregt sein müssen, damit das Neuron erregt wird.

Das (abstrakte) Modell dieser Hypothesen ist das abstrakte Neuron, der Baustein der Nervennetze. Mit solchen Neuronen lassen sich die aussagenlogischen Verknüpfungen leicht realisieren. Die Alternative wird von einem Neuron mit 2 treibenden Endknoten und dem Schwellenwert 1 realisiert, denn dieses Neuron ist dann und nur dann erregt, wenn der eine Endknoten oder der andere Endknoten erregt ist.

Die Konjunktion wird durch ein Neuron mit 2 treibenden Endknoten und dem Schwellenwert 2 realisiert: Dieses Neuron ist dann und nur dann erregt, wenn der eine und der andere Endknoten erregt sind. Die Realisierung der Negation erfolgt durch ein Neuron mit dem Schwellenwert 1, das einen hemmenden Endknoten und einen treibenden Endknoten besitzt, der ständig erregt ist. Offenbar ist dieses Neuron dann und nur dann erregt, wenn der hemmende Endknoten nicht erregt ist.

Aus den Ergebnissen des Aussagenkalküls folgt, dass man mit Neuronen dieser drei Typen jede Wahrheitsfunktion realisieren kann. Allerdings kennt die Physiologie keine drei Typen von Neuronen. Wir wissen aber, dass man alle Wahrheitsfunktionen bereits durch Verkettung einer zweistelligen Wahrheitsfunktion erzeugen kann, z. B. der Nicod-Funktion. Für die klassischen Wahrheitsfunktionen wollen wir die entsprechenden Gleichungen hier angeben:

$$\text{non}(w_1) = \text{nic}(w_1, w_1)$$

$$\text{vel}(w_1, w_2) = \text{nic}(\text{nic}(w_1, w_2), \text{nic}(w_1, w_2))$$

$$\text{et}(w_1, w_2) = \text{nic}(\text{nic}(w_1, w_2), \text{nic}(w_1, w_2))$$

Um die Darstellungen von seq und aeq durch nic zu erhalten, braucht man nur in die Glei-

chungen

$$\text{seq}(w_1, w_2) = \text{vel}(\text{non}(w_1), w_2)$$

$$\text{aeq}(w_1, w_2) = \text{et}(\text{seq}(w_1, w_2), \text{seq}(w_2, w_1))$$

für non, et und vel ihre Darstellungen durch nic einzusetzen. Dabei ergibt sich zum Beispiel:

$$\text{seq}(w_1, w_2) = \text{nic}(\text{nic}(\text{nic}(w_1, w_1), w_2), \text{nic}(\text{nic}(w_1, w_1), w_2)).$$

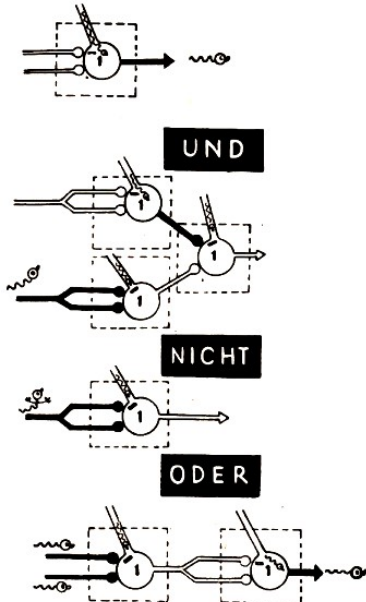


Bild 10.5.: Man kann alle aussagenlogischen Verknüpfungen bereits mit Schaltungen, die nur aus Neuronen eines Typs bestehen, realisieren. Ein solches "universelles" Neuron ist das Nicod-Neuron.

Daher kann man bei der Realisierung beliebiger aussagenlogischer Funktionen prinzipiell mit Neuronen eines Typs, z.B. "Nicod-Neuronen" auskommen.

Das Nicod-Neuron besitzt einen treibenden Endknoten, der ständig erregt ist und zwei hemmende Endknoten (die Eingänge für die zu verarbeitenden Signale). Sein Schwellenwert ist 1. Dieses Neuron ist dann und nur dann erregt, wenn beide (hemmenden) Endknoten nicht erregt sind, so wie die Nicod-Funktion dann und nur dann den Wert W annimmt, wenn beide Argumente den Wert F haben.

Wir haben gesehen, dass ein und dasselbe abstrakte Modell (z. B. der Aussagenkalkül) zur Beschreibung recht verschiedener Erscheinungen in der Realität dienen kann. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass man aus einem Modell nicht mehr Information ableiten kann, als man (bewusst oder unbewusst) bei seiner Konstruktion hineingesteckt hat.

Wenn sich mitunter unerwartete Zusammenhänge und Folgerungen ergeben, dann liegt das daran, dass die im Modell widergespiegelten Eigenschaften und Beziehungen allgemeiner und wichtiger sind, als man ursprünglich angenommen hat. Die Konstruktion eines Modells ist - wie oben erwähnt - stets mit einem Informationsverlust verbunden, erst bei der Anwendung und Verbesserung des Modells wird Information gesammelt.

Wichtig ist aber, dass bei der Konstruktion eines der Realität adäquaten Modells, d. h. eines Modells, das die untersuchten realen Gegebenheiten richtig widerspiegelt, stets nur Information über im jeweiligen Zusammenhang unwesentliche Einzelheiten verlorengeht - die wertvolle Information bleibt erhalten. Erst durch die Konstruktion von Modellen wird geklärt, welche Eigenschaften der untersuchten Erscheinungen wesentlich sind - welche Informationen wertvoll sind. Wesentlich sind gerade jene Eigenschaften, auf denen adäquate Modelle basieren.

Unsere Voraussagen über zukünftige Ereignisse beruhen auf unserer Erkenntnis von der Welt, also auf Informationen über Vergangenheit und Gegenwart. Die Gesamtheit dieser Erkenntnisse bildet unser (abstraktes) Modell der Welt, an dem wir unsere Entscheidungen überprüfen, bevor wir handeln. Jedoch sind unsere Voraussagen im allgemeinen nicht sicher und können das auch nicht sein, weil der Gang der Welt nicht vollkommen determiniert ist.

Die Voraussagen sind nur mehr oder weniger wahrscheinlich richtig. Auf der Suche nach einer Möglichkeit zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit stehen wir vor folgendem Problem, dem Grundproblem der induktiven Logik:

Auf Grund von Ereignissen in der Vergangenheit wird eine Hypothese formuliert, die diese Ereignisse erklärt und der kein bekanntes Ereignis widerspricht.

Vielfach ist es unmöglich, solche Aussagen unmittelbar in der Realität auf ihre Richtigkeit nachzuprüfen, z.B. wenn es sich um Aussagen über eine, sehr große Klasse von Dingen handelt, die man nicht alle durchprüfen kann, oder wenn man die physikalischen Mittel dazu (noch) nicht besitzt, wie das bei der Aussage "Die Marsmonde sind hohl" der Fall ist.

Es möge nun ein Ereignis beobachtet werden, das bisher unbekannt war. Wenn dieses Ereignis der Hypothese widerspricht, dann ist diese damit als unrichtig nachgewiesen. Wenn das Ereignis der Hypothese nicht widerspricht, dann stellt sich unser Problem:

In welchem Grade hat das Eintreten dieser Ereignisses die Hypothese bestätigt? Anschaulich gesprochen: Um wieviel ist die Hypothese "wahrscheinlicher" geworden?

Dieses Problem konnte bisher nicht gelöst werden. Als weiteres wichtiges Problem ist in diesem Zusammenhang die Aufgabe zu nennen, die Informationsmenge zu berechnen, die in einer Voraussage liegt, von der bekannt ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie zutrifft. Dabei muss sich z. B. ergeben, dass eine Voraussage, die mit der Wahrscheinlichkeit  $1/2$  zutrifft, überhaupt keine Information liefert.



## 11 Signalwandler, aus ihnen setzt sich jede automatische Maschine zusammen



Wenn es gleichgültig ist, ob es sich um eine Schnur, einen Nerv oder einen Draht handelt - Die Nachrichtentechnik löst Probleme der Automation - Von "Ionengeräten" zur Elektromechanik - Erfindungen aus dem Arsenal des Telegrafen - Der Bildtelegraf - Sprechende Maschinen und das Telefon - Von der Elektromechanik zur Elektronik, zu kontaktlosen Umformern - Die nächsten Verwandten der Elektronenröhre - Ein Kristall tritt an die Stelle des Vakuums - Das Solion, ein Modell der lebenden Zelle.

Um eine Naturerscheinung völlig zu verstehen, müssen wir sie reproduzieren, wir müssen sie modellieren und Experimente anstellen. Um uns von der Richtigkeit unserer Vorstellungen über die Arbeit eines gegebenen Signalsystems zu überzeugen, müssen wir es bauen - zumindest in Gedanken.

Aristoteles stellte sehr viele Eigenschaften des Denkens fest, aber er konnte nicht eine erklären. Mit der Physiologie des Nervensystems, also mit der Funktionsweise des Gehirns, beschäftigte sich schon Alkmäon, ein Schüler des Pythagoras. Besondere Berühmtheit erlangten die Gedanken von Descartes über das Gehirn, wenn auch das, was er über das Nervensystem schrieb, heute naiv und komisch klingt.

Zu jener Zeit wurden einfache Gestänge zur Steuerung der Maschinen und hydraulische und pneumatische Systeme zur Kraftübertragung verwendet. Descartes nahm an, dass in einem Nerv, der zum Gehirn führt, eine feine Schnur verläuft, die sich bei jeder Reizung zusammenzieht und im Gehirn ein Ventil öffnet; aus dem Gehirn strömt dann durch das Ventil ein besonderes Nervengas aus, das durch einen Hohlnerf in den Muskel gelangt und diesen aufbläst, wodurch sich der Muskel verdickt und zusammenzieht, also eine Bewegung ausführt.

Das Strukturschema von Descartes war richtig, aber seine Vorstellungen von der Arbeit der Elemente dieses Schemas waren natürlich falsch.

Descartes entdeckte den Reflex, den Reflexbogen, und dieses Verdienst können die von ihm ausgedachten "Nervenschnüre", "Ventile" und das "Gas" nicht schmälern.

Bis zu Pawlow, der die Lehre von den bedingten, zeitweiligen Reflexen schuf, drehte sich die ganze Wissenschaft der Nerventätigkeit um den Descartesschen Begriff des Reflexes. Praktisch hat Descartes die Methode der Kybernetik benutzt, denn anstelle des realen, aber unverständlichen und mit den ihm bekannten technischen Mitteln nicht zu reproduzierenden Nervensystems beschrieb er ein ihm isomorphes pneumatisch-mechanisches System, das analog dem Reflexbogen im Organismus funktioniert - besser ausgedrückt, funktionieren soll.

Diejenigen, die später an Präparaten lebender Gewebe zeigten, dass in den Nerven keine "Schnüre" existieren, haben zwar bewiesen, dass Descartes' Modell nicht den realen Gegebenheiten entspricht, konnten aber die Rolle der Nerven bei der Steuerung des Organismus nicht klären.

Eine gedankliche kybernetische Modellierung führte auch Pawlow durch, indem er die Tätigkeit des Nervensystems wiederholt mit der Arbeit einer automatischen Telefonzentrale verglich, in der zeitweilig Verbindungen zwischen Reflexbögen zustande kommen und wieder abreißen.

Als ausgezeichneter Kenner der Anatomie nahm Pawlow nicht an, dass irgendwo im Gehirn Kontakte, Sperrräder und Elektromagnete verborgen seien. Er sagte, die Arbeit der Telefonzentrale sei der des Nervensystems analog, sie sei "annähernd" ebenso.

Wie weit die Analogie geht, wie groß der Grad der Annäherung ist, darüber entstanden dann endlose Streitigkeiten.

Man hätte - um diesen Streit zu entscheiden - eine Telefonzentrale bauen (oder zumindest projektieren) müssen, die so viele Kontakte und Verbindungen hat wie beispielsweise das Gehirn einer Ratte oder eines Hundes Neuronen und Nervenfasern enthält, und nachprüfen, ob diese Zentrale annähernd das gleiche leistet wie das Gehirn einer Ratte oder eines Hundes. Wenn ja, dann ist diese Modellierung adäquat, wenn nein, so bedarf die Analogie wesentlicher Präzisierungen.

Dem entscheidenden Experiment stand aber die falsche Vorstellung im Wege, dass keine Kombination von Telefonbauteilen die Arbeit des Nervengewebes "richtig" wiedergeben kann, weil das Nervensystem und die Telefonzentrale von verschiedener stofflicher Natur sind. Ingenieure und Techniker bewiesen aber in der Praxis, dass man Elemente von Signalsystemen durch in Bezug auf die Funktionsweise analoge (funktionsgleiche) ersetzen kann.

In der Tat: Wenn irgendeine Schnur eine Bewegung auf ein Ventil übertragen soll, so ändert sich die Arbeit des Systems nicht wesentlich, wenn wir anstelle der Schnur eine andere Übertragung wählen: eine biegsame Welle, einen Hebel, ein Zahnrad, eine elektrische, pneumatische oder hydraulische Leitung.

Daher kann man bei der Projektierung von Signalsystemen zur Modellierung einer Erscheinung (und der nachfolgenden Präzisierung ihrer Theorie) oder für praktische Zwecke gewisse Verbindungen und sogenannte "schwarze Kästen" verwenden, von denen man lediglich ihre Funktionsweise, d. h. die realisierte Signalumwandlung angibt, ohne ihre physikalische Natur und ihren inneren Aufbau zu präzisieren.

Den einen realisiert man dann mechanisch, andere pneumatisch oder elektronisch.

Sind dabei die Arbeitsgeschwindigkeiten und die Leistungen, die übertragen werden, aufeinander abgestimmt, so ist die von der gesamten Anlage realisierte Signalverarbeitung wohlbestimmt. So kann man bei der mathematischen Operation<sup>43</sup>

$$2^{14} \Rightarrow 16384$$

weder der Zeichenreihe  $2^{14}$  noch der Zeichenfolge 16384 ansehen, wie diese Operation durchgeführt wird: "im Kopf", mittels einer mechanischen oder elektronischen Rechenmaschine oder einer Tabelle.

Welche Elemente verwendet man nun gewöhnlich bei der Konstruktion von Systemen zur Signalverarbeitung?

---

<sup>43</sup>Das Zeichen " $\Rightarrow$ " ist zu lesen als "ergibt" oder "kann ersetzt werden durch".

Vor allen Dingen Leitungen (Übertragungskanäle), die die Signale ohne wesentliche Änderung ihrer Natur, Form, Reihenfolge und Auftrittszeit von einem Punkt des Raums zu einem anderen übertragen. Ferner Verzögerungsglieder (Speicherelemente), die die bei ihnen eintreffenden Signale nach Ablauf einer gewissen Verzögerungszeit wieder abgeben.

Bei manchen Speicherelementen können die gespeicherten Signale mehrmals ausgesendet werden, bei anderen erst auf ein spezielles Abrufsignal hin. Außerdem braucht man Verstärker (Relais oder lineare Verstärker), die die Leistung oder die spezifische Stärke der Signale erhöhen, ohne ihre Reihenfolge und ihre Form zu ändern.

Besonders wichtig sind naturgemäß jene Elemente, die Signale verarbeiten, z. B. aus mehreren Signalen ein anderes erzeugen. Das "Nicod-Neuron" wandelt z. B. zwei Serien von (Einzelsignalen) in eine Signallerie um, indem es seinen Ausgang immer und nur dann erregt, wenn seine beiden Eingänge nicht erregt sind.

Dazu gehören die Filter (Ventile u. a.), die aus der Menge der eintreffenden Signale diejenigen aussondern, die ihrer Charakteristik (ihren Eigenschaften) entsprechen. Einrichtungen, die Signale einer bestimmten physikalischen Natur (z. B. Schall, Licht, mechanische Bewegung) in Signale einer anderen Natur (z. B. in einen elektrischen Strom oder eine Spannung) umwandeln, nennt man gewöhnlich Signalwandler.

Kybernetische Systeme, die sich aus den angegebenen Elementen aufbauen, Eingänge und Ausgänge für Signale haben, bilden als Ganzes genommen wieder einen Signalwandler und können somit als Teilsysteme komplizierterer Gesamtsysteme, als Realisierung von "schwarzen Kästen" auftreten.

Betrachten wir als Beispiel ein Fieberthermometer. Das in einem kleinen Kolben befindliche Quecksilber ist ein Signalwandler. Es setzt die Temperaturschwankungen der Umgebung in Volumenänderungen des Quecksilbers um. Dabei tritt das Quecksilber in eine Kapillare ein, die dicht am Ansatz des Kolbens stark gekrümmt - geknickt ist.

Dieser Knick wirkt wie ein "Filter", ein Ventil, so dass sich die Quecksilbersäule in der Kapillare zwar bei Ausdehnung des Quecksilbers (Temperaturerhöhung) im Kolben verlängern kann, aber nicht (durch Rückkehr des Quecksilbers in den Kolben) wieder verkürzen, wenn die Temperatur wieder absinkt.

Die Quecksilbersäule bildet also ein Verzögerungsglied, sie "merkt sich" die höchste Temperatur. Die vom Quecksilber abgegebenen Signale - die Volumenänderungen - werden dadurch differenziert und mit bloßem Auge unterscheidbar, dass die Kapillarröhre einen sehr geringen Querschnitt hat.

Die Thermometerskala transformiert die stetig veränderliche Länge der Säule in diskrete Gradzahlen und ihre Zehntel. Man kann Maximum-Thermometer bauen, die nicht wie das Quecksilberthermometer hydraulisch arbeiten, sondern z. B. elektrisch, die von ihnen realisierte Signalverarbeitung, und damit ihr "schwarzer Kasten", ist aber mit dem des Fieberthermometers identisch.

Die Nachrichtentechnik hatte als erster Zweig der Technik in größerem Umfang mit der Erzeugung, Übertragung und Verarbeitung von Signalen zu tun. Daher sind in ihrem Rahmen viele Bauelemente für kybernetische Systeme entwickelt worden.

Seit den ältesten Zeiten verlief die geistige Entwicklung des Menschen parallel zur Entwicklung seiner Sprache. Häufig konnten sich die Menschen aber bei der Koordinierung ihrer Handlungen nicht auf die Lautsprache beschränken.

Dieser Kode ist nur dann verwendbar, wenn der Mensch, der die Information aussendet (kurz, der Erzählende), und der Mensch, der die Information aufnimmt (der Hörende), sich zur gleichen Zeit am gleichen Ort befinden: Die Wirkung gesprochener Worte ist zeitlich und räumlich eng begrenzt. Sollte eine Nachricht über eine große Entfernung übertragen oder gerade abwesenden Verwandten hinterlassen werden, so nahm man vereinbarte Kodes zu Hilfe.

Als Kodewörter dienten Rauchfahnen von Feuern, Trommelschläge, in Holz geschnittene, in Stein oder Platten geritzte oder mit Farbe auf Stoffe gemalte Zeichen und ähnliche Signale. Nur die elementarsten von ihnen - die Zeichnungen - konnte jeder verstehen.

Um zu verstehen, was drei Rauchsäulen am Horizont bedeuten, muss man vorher verabreden, was gewisse Kombinationen von Rauchsäulen bedeuten sollen, d. h. eine Unbestimmtheit schaffen, die durch das empfangene Kodewort beseitigt wird. Man kann zum Beispiel vereinbaren, dass eine Rauchsäule ein Signal ist, das bedeutet: "Kommt zum Festmahl!", während zwei Rauchsäulen bedeuten: "Wir rufen euch zu Hilfe!" und drei: "Rettet euch, es kommt ein starker Feind". Durch eine derartige Kodierung von Gesprochenem konnten diejenigen Nachrichten, für die ein Kodewort vereinbart war, über bestimmte Entfernungen übertragen werden.

Durch die Entwicklung der Schrift wurde es möglich, Gesprochenes in geschriebener Form zu speichern und zu übertragen. Diese Übertragung befriedigte jedoch wegen ihrer geringen Geschwindigkeit nicht, diese Lage wurde auch durch die Erfindung des optischen Telegrafen, des "Semaphor", nur wenig geändert.

Erst die Verwendung elektrischer Geräte führte zu einer technischen Revolution auf dem Gebiet der Nachrichtenübertragung. Aber schwache elektrische Signale sind der menschlichen Wahrnehmung unzugänglich. Vor den Ingenieuren stand daher die Aufgabe, Signalwandler zu schaffen, nämlich solche, die Kodewörter eines traditionellen Kodes (Sprache, Schrift) in Kombinationen elektrischer Signale umwandeln (die Sender), und solche, die die umgekehrte Transformation in den traditionellen Kode ausführen (die Empfänger).

Der erste elektrische Effekt, der zur Nachrichtenübertragung benutzt wurde, war das Ausfällen von Metallen bei der Elektrolyse, die Galvanoplastik, die der russische Gelehrte B. S. Jacobi entdeckte. Der Empfänger des ersten elektrischen von Sömmering 1809 vorgeschlagenen und völlig unpraktischen Telegrafen zeigte durch die Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff an, zwischen welchen beiden von 25 den einzelnen Buchstaben zugeordneten Leitungen eine elektrische Spannung lag, welcher Buchstabe also übermittelt werden soll.

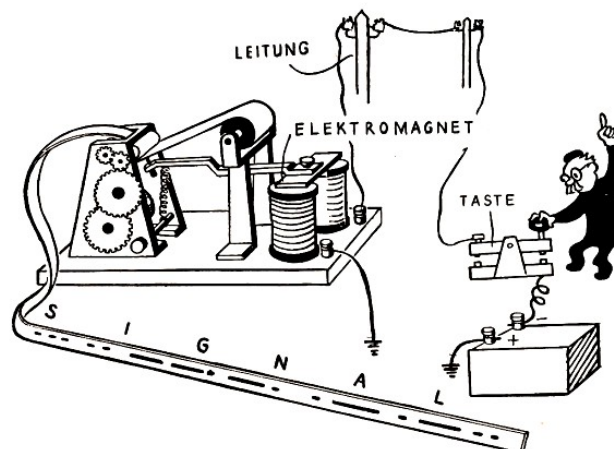


Bild 11.1.: Beim Morse-Telegraphen wird ein Kode benutzt, der dem binären ähnlich ist. Er ermöglicht es, Information über große Entfernungen zu übertragen und die Signale in Form von Punkten und Strichen auf einem Papierstreifen festzuhalten.

Größere praktische Bedeutung für die Nachrichtentechnik gewannen die magnetischen und die thermischen Wirkungen des elektrischen Stroms.

Im Jahre 1843 schuf der amerikanische Maler Samuel Morse den ersten praktisch verwendbaren Telegrafen auf der Grundlage des Elektromagnetismus. Sein Sender war ein einfacher Kontakt, eine Taste, und der Empfänger ein Elektromagnet mit einem Schreibrädchen, das auf einem daran vorbeilaufenden Papierstreifen Striche hinterlässt: kurze bei Impulsen geringer Länge und lange, wenn der Strom länger eingeschaltet wird.

Die praktische Verwendung der Erfindung von Morse beruht auf einem Kode, der den Buchstaben, Ziffern und Satzzeichen Kodewörter aus drei Zeichen zuordnet, nämlich Punkt (d. h. kurzer Strich), Strich (langer Strich) und Zwischenraum (Leerstelle).<sup>44</sup>

Morse kam zu dem Schluss, dass es notwendig ist, die statistische Natur der zu übertragenden Nachrichten und insbesondere die Häufigkeit der Buchstaben in den zu kodierenden Buchstabenfolgen bei der Wahl einer Kodierung zu berücksichtigen. Für die am häufigsten auftretenden Buchstaben führte er die kürzesten Kombinationen von Punkten, Strichen und Zwischenräumen ein und für seltene Buchstaben lange Kombinationen.

Moderne Untersuchungen auf der Grundlage der Informationstheorie haben gezeigt, dass die Längen der Kodewörter des Morse-Alphabets den Häufigkeiten der Buchstaben (in englischsprachigen Texten) sehr gut entsprechen und dass Morse diese Möglichkeit der Erhöhung des Informationsgehalts der Kodierung fast ausgeschöpft hat.

Der gehaltvolle Kode von Morse besitzt jedoch eine entsprechend geringe Stabilität gegenüber Störungen, die sich besonders bei Übertragungen über große Entfernungen unliebsam bemerkbar machen. Da kam ihm ein sehr einfaches, aber sehr wichtiges Gerät zu Hilfe, das Relais.

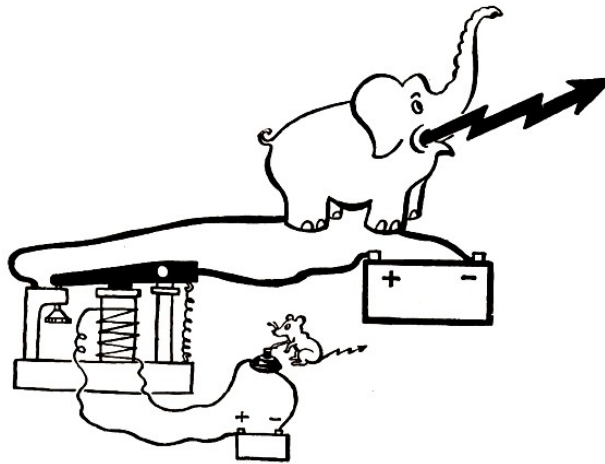


Bild 11.2.: Das bistabile elektromagnetische Relais tauchte zuerst in der Telegrafie auf und wurde dann zu einem sehr wichtigen Element der industriellen Automatisierung. Ein schwacher Strom schließt hier den Kreis eines stärkeren; ein binäres Signal wird verstärkt.

Dieses französische Wort bezeichnete in alten Zeiten eine Station, an der ermüdete Postpferde ausgespannt und frische, ausgeruhte und gefütterte Pferde eingespannt wurden. Diese "Relais" ermöglichten es der Post zu jenen Zeiten, Briefe verhältnismäßig schnell - ohne durch Erholung und Fütterung der Pferde bedingten Zeitverlust - an ihren Bestimmungsort zu bringen.

---

<sup>44</sup>Genau genommen benutzt das Morse-Alphabet nur zwei Zeichen, nämlich Punkt und Zwischenraum. Für das "Morsen" gilt nämlich die Festlegung: Ein Strich hat die Länge von 5 Punkten, d. h., jeder Strich kann ohne weiteres durch fünf Punkte, die durch keinen Zwischenraum getrennt sind, ersetzt werden.

Wie die Pferde, so "ermüden" auch die Signale, d. h., sie werden durch den Widerstand der Leitung geschwächt und durch Rauschen verzerrt. Daher unterteilt man die Telegraphenleitung in einzelne Abschnitte, zwischen die Relais, Signalverstärker, eingeschoben sind. Ein Relais besteht aus einem Elektromagneten, der, wenn er von einem hinreichend starken Strom durchflossen wird, einen Kontakt schließt und auf diese Weise ein Signal weiterschickt.

Das elektromagnetische Relais realisiert also eine Sprungfunktion - entweder der die Spule durchfließende Strom ist hinreichend stark - dann ist der (Arbeits-) Kontakt geschlossen - oder der Strom ist zu schwach. dann ist der Kontakt geöffnet; es besitzt also nur die beiden (stabilen) Zustände "eingeschaltet" und "ausgeschaltet". Man spricht daher auch von einer Sprungcharakteristik, ähnlich jener der Neuronen.

Das Relais wurde zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Automatisierung, da es mit seiner Hilfe möglich ist, einen starken Strom durch einen schwachen zu steuern. Ein schwaches elektrisches Signal kann über ein oder mehrere Relais einen Strom von beliebiger Stärke steuern. Verstärker, die die Stromstärke in dem gesteuerten Kreis stetig ändern, haben bisher in der Automation keine solche Bedeutung wie die "extremalen" Relais erlangt.

Ein wichtiger Fortschritt der Telegrafentechnik war die Schaffung automatischer programmgesteuerter Telegrafensender durch Wheatstone. Diese Sender verarbeiten einen perforierten Papierstreifen, in den die Kodezeichen der zu sendenden Signale manuell gelocht werden sind. Das ermöglicht es, die Signale mit Geschwindigkeiten abzuschicken, die bei einer manuellen Eingabe der Signale nicht zu erreichen sind, wodurch die Leitung besser ausgenutzt wird. Ferner ist es möglich, die Frequenzcharakteristik der Leitung mit jener der zu übertragenden Signalfolge abzustimmen.

Noch größer ist die Bedeutung von Kodier- und Dekodiergeräten, die traditionelle Codes in telegrafische und umgekehrt umwandeln. Das Morse-Alphabet ist trotz aller seiner Vorzüge ein künstlicher Kode; die Übertragung in diesen Kode und sein Lesen erfordert eine besondere Ausbildung.

Bei der Übertragung treten unvermeidlich Fehler auf. Der Telegrafist kann ein Wort entstellen, weil er es "so nicht versteht", weil er anstelle eines Punktes einen Strich liest oder aus anderen Gründen. Der russische Gelehrte B. S. Jacobi konstruierte im Jahre 1850 einen Telegrafensender, der Buchstaben druckte.

Die Konstruktion von Schreibmaschinen, die über größere Entfernungen durch elektrische Signale gesteuert werden bzw. die Zeichen eines Kodes in solche Signale umwandeln, wurde vervollkommenet.

Diese Entwicklung führte zu dem heute verwendeten Fernschreiber, der den jedem lese- und schreibkundigen Menschen geläufigen Buchstabenkode ohne jede Beteiligung des Menschen buchstabenweise in entsprechende Kombinationen elektrischer Signale verwandelt und anschließend die Signalkombinationen wieder in Buchstaben zurückverwandelt.

Der Ingenieur Baudot, der Schöpfer der am meisten verbreiteten Fernschreiberkonstruktion, stellte einen Kode zusammen, der jedem Buchstaben des Alphabets eine Kombination von fünf positiven oder negativen Stromstößen zuordnet. Der Baudotsche Kode ist ein binärer Kode für die Buchstaben; jedem Buchstaben entspricht eine Kombination von Nullen und Einsen:

A - 11000,      B - 10011,      C - 01110,      D - 10010,      E - 10000 usw.

Wenig beachtet blieb in der Geschichte der Nachrichtenübermittlung eine Erfindung des Amerikaners Elisha Gray (1835-1901). Gray baute einen Apparat, der die Bewegungen einer zeich-

nenden oder schreibenden Hand in stetige Veränderungen elektrischer Ströme umsetzt. Dazu wird die Bewegung eines Punktes (im vorliegenden Falle der Bleistiftspitze) in einer (zwei-dimensionalen) Ebene in zwei Komponenten zerlegt. Diese Bewegungskomponenten steuern die Abgriffe zweier Potentiometer und ändern so die Stromstärke in zwei parallelen Kreisen, die im Empfänger durch zwei Elektromagnete in die entsprechende Bewegung eines Schreibstifts umgewandelt werden.

Dieser sogenannte Teleautograf kann nicht nur Buchstaben mit allen Besonderheiten der Handschrift übertragen, sondern beliebige Zeichnungen, die sich in der (durch die Konstruktion gegebenen) Bildebene unterbringen lassen. Diese Form des Telegrafs konnte mit dem gewöhnlichen Morsetelegrafen nicht konkurrieren, da die Verstärkung mit Hilfe von Relais hierbei nicht möglich ist.

Der Teleautograf zeigt aber sehr anschaulich, dass eine verhältnismäßig einfache Kodierung von sehr komplizierten Signalen möglich und sogar in gewissem Umfange praktisch anwendbar ist.

Tatsächlich wird eine ganze Landschaft, ein raffinierter Schnörkel oder das Profil eines schönen Mädchens eindeutig in zwei Folgen von Schwankungen der Stromstärke in den beiden Kanälen des Teleautografen zerlegt, und diese Schwankungen übermitteln alle Elemente des Gefühls und des "Künstlerischen", die in der telegraphierten Abbildung vorhanden sind.

Die Konstruktion des Teleautografen entsprach dem Bedürfnis, Abbildungen über größere Entfernungen zu übertragen. Wir wissen bereits, dass Abbildungen zweidimensionale Signale sind und sich im Prinzip in ein eindimensionales Signal umformen lassen, sogar in ein binäres. Wie führt man das aber praktisch durch?

Die Überlagerung zweier Bewegungen, einer Rotation und einer Translation, liefert eine Spirale, durch die eine Zylinderfläche abgewickelt wird. Diese Tatsache benutzte der englische Ingenieur Buckwell 1848 bei der Konstruktion eines Bildtelegrafen.

Der Sender von Buckwell besteht aus zwei Hauptteilen: einem Zylinder, auf den die zu übermittelnde Abbildung mit isolierendem Lack gemalt wurde, und einem Gleitkontakt, der längs der Achse des Zylinders verschoben wird und dessen Oberfläche berührt.

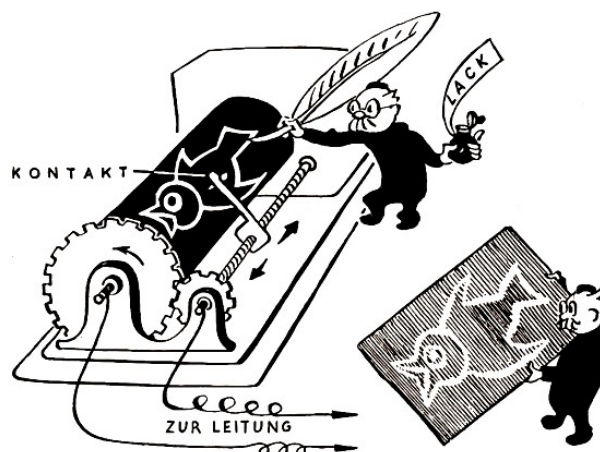


Bild 11.3.: Der "Bildtelegraf" von Buckwell kann eine zweidimensionale Nachricht längs einer Spirale zu einer eindimensionalen abwickeln, sie über eine gewisse Entfernung übertragen und dann in der früheren Form wiederherstellen. Die Abbildung wird mit isolierendem Lack auf eine Metalltrommel aufgetragen und durch einen Kontakt abgetastet.

Der Empfänger besteht ebenfalls aus einem Zylinder mit axial verschiebbarem Gleitkontakt.

Beim Empfang eines Bildes wird der Zylinder mit einem Blatt Papier umwickelt, das mit einem Elektrolyten [einer Lösung von Kaliumhexazyanoferat (II)] getränkt ist, aus dem sich bei Stromdurchfluss eine Farbe abscheidet. In der Leitung, die Sender und Empfänger miteinander verbindet, fließt ein Strom, solange der Kontakt des Senders auf einer unbemalten Stelle des Zylinders schleift.

Wenn Sender und Empfänger synchron, d. h. mit der gleichen Geschwindigkeit und dem gleichen Anfangszeitpunkt arbeiten, dann erscheint an der entsprechenden Stelle des Papiers im Empfänger eine dunkle Spur.

Eine Reihe von Mängeln - die Störanfälligkeit, die Unmöglichkeit, in Grautönen abgestufte Abbildungen zu übertragen, die Notwendigkeit, die Abbildung zuerst mit Lack auf den Sendezylinder zu malen, die Schwierigkeit, eine volle Synchronisation zwischen Sender und Empfänger zu erreichen - verhinderte eine weite Verbreitung der Buckwellschen Konstruktion.

Zehn Jahre später vervollkommnete der italienische Abt Caselli den Apparat von Buckwell so weit, dass er zur Übertragung von Abbildungen praktisch geeignet war. Im Jahre 1860 wurde auf der Strecke Paris-Lyon und 1867 auf der Strecke Petersburg-Moskau der Telegrafverkehr aufgenommen.

Bei der weiteren Verbesserung dieser Konstruktion konzentrierte man sich zu Beginn unseres Jahrhunderts vor allem darauf, den Sender zu vervollkommen, um das manuelle Auftragen der Abbildungen auf den Zylinder zu sparen. Vielversprechend erschien den Konstrukteuren der folgende Effekt:

Projiziert man ein Bild auf eine mit Chromgelatine beschichtete Platte, dann wird die Gelatine an den belichteten Stellen gegerbt und bleibt nur an den Stellen, die nicht dem Licht ausgesetzt waren, löslich. Spült man die Platte mit Wasser ab, so entsteht ein der Abbildung entsprechendes Relief auf der Platte: die Erhebungen entsprechen den beschatteten Teilen der Abbildung (die Gelatine quillt hier auf), und die gegerbten und nicht aufgequollenen Stellen entsprechen den belichteten Stellen.

Es brauchte also nur noch ein Relief in Stromschwankungen umgewandelt zu werden. Dazu wurden verschiedene Signalwandler konstruiert. Eine Vorrichtung benutzt ein ähnliches Prinzip wie das Kohlekörnermikrofon: eine über das Relief gleitende Nadel bewegt dabei eine Wand einer Schachtel mit Kohlekörnchen.

Je nachdem, ob die Kohlekörnchen mehr oder weniger zusammengedrückt sind, setzen sie dem elektrischen Strom einen geringeren oder größeren Widerstand entgegen - damit verändert sich die Stärke des Stroms durch die Schachtel.

Bei einer anderen Vorrichtung wurde der Strom direkt durch die Gelatineschicht geleitet. An den nicht gequollenen Stellen, wo die leitenden Chromteilchen dicht aneinanderlagen, ist der Widerstand geringer als an den anderen Stellen. In einem dritten Signalwandler wurde der Gelatine Eisenpulver zugesetzt. Dann führte man die Platte zwischen einem Elektromagneten und einer Spule hindurch. Dabei werden in der Spule Signale induziert, die der Stärke der Gelatineschicht entsprechen.

Aber alle diese Methoden erwiesen sich als praktisch wenig geeignet. Bis zur Erfindung des Fotoelements, von dem später die Rede sein wird, war die Technik der telegrafischen Bildübermittlung wenig entwickelt.

Schon früher wurde nach Konstruktionen gesucht, mit deren Hilfe Laute und insbesondere die menschliche Sprache kodiert bzw. dekodiert werden können. Es ist schwer, sich eine "sprechende Maschine" vorzustellen, die beispielsweise das Wort "Hund" ausspricht, wenn man die



entsprechenden Buchstaben eintastet.

Trotzdem versuchten schon im achtzehnten Jahrhundert viele begabte Mechaniker, solche Maschinen zu bauen. Es leitete sie dabei, wie wir heute sagen würden, ein rein "kybernetisches" Interesse; sie glaubten und wollten beweisen, dass eine Maschine sprechen kann wie der Mensch. Im Jahre 1799 erschien die sprechende Maschine von Kratzenstein, die in ihrem Aufbau der Kehle des Menschen ähnlich war, und 1841 die Maschine von Faber, die von 14 Tasten gesteuert wurde und sich zum Entzücken der Zuhörer schon zu "verschiedenen Themen" äußerte.

Das spezielle Interesse der Erfinder an der Nachbildung der Sprache erlosch, als die Möglichkeit entdeckt worden war, beliebige Kombinationen hörbarer Laute aufzuzeichnen und wiederzugeben.

Der Physiker T. Young "zeichnete" 1807 zum ersten Mal "einen Laut auf", und zwar prägte er ihn als sägezahnförmige Furche in ein weiches Material ein; er war aber nicht in der Lage, die umgekehrte Umwandlung durchzuführen.

Das gelang 1877 dem großen Erfinder Thomas Alva Edison (1847-1931). Mit dem Edisonschen Phonographen begann die Entwicklung einer vielfältigen Technik der Tonaufzeichnung, wenn auch die "sprechenden Maschinen" durchaus nicht so funktionieren, wie sich die ersten Erfinder das vorgestellt hatten und in nichts den Sprechorganen des Menschen ähneln.

Im 19. Jahrhundert kamen anstelle der "sprechenden Maschinen" Mikrofon und Telefon auf, d. h. Signalwandler, die beliebige Laute in elektrische Signale und umgekehrt umwandeln. Sie fanden schnell allgemeine Anerkennung und Verbreitung. Einer der ersten Erfinder der (drahtgebundenen) Telefonie, Philipp Reis, erreichte die Tonübertragung durch diskrete elektrische Signale.

Im Sender berührt eine unter dem Einfluss von Schallwellen schwingende Membran eine Nadel - Nadel und Membran bilden dabei einen Schalter, der die Schallwellen durch Stromstöße kodiert. Der Empfänger, dem diese Stromstöße zugeleitet werden, besteht aus einer Spule, deren Anker (ein dünner Stab) Schwingungen der entsprechenden Frequenz ausführt und damit Schallwellen erzeugt.

Berühmtheit und Verbreitung erlangte das Telefon von Graham Bell. Bei diesem System sind Sender und Empfänger völlig gleich. Beide bestehen aus Elektromagneten, vor deren Pole eine dünne eiserne Membran schwingfähig angebracht ist. Erzwungene Schwingungen der Membran rufen Veränderungen der Stromstärke in den Wicklungen hervor; diese werden durch die Leitung übertragen, und im anderen Wandler (dem Empfänger) rufen diese Stromschwankungen Eigenschwingungen der Membran hervor. Der Bellsche Kode arbeitet also mit stetigen Signalen.

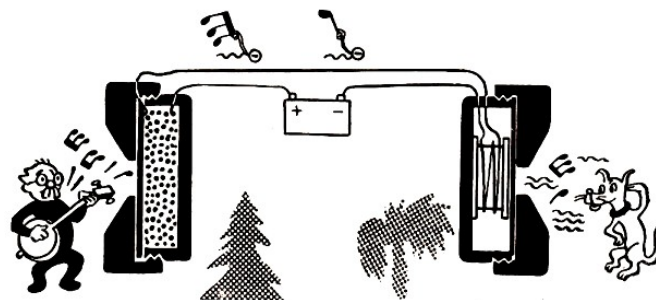


Bild 11.4.: Das Mikrofon verwandelt akustische Signale in elektrische, diese werden durch eine Leitung übertragen und vom Telefon wieder zurück in akustische Signale verwandelt.

Die Konstruktion des Senders wurde 1878 von Edison von Grund auf geändert. Der Sender (das Kohlemikrofon) von Edison ist ein Schächtelchen mit einer Graphitmembran und Graphitkörnchen im Innern. Dieses Edisonsche Mikrofon und der Bellsche Hörer (das Telefon) werden in den modernen Telefonapparaten ohne wesentliche Änderungen verwendet.

Die Verbreitung des Telefons, das zunächst ebenso wie der Telegraf nur zwei ausgewählte Punkte miteinander verband, führte zu Telefonnetzen, d. h. Mengen von Telefonapparaten, die über einen Umschaltpunkt, die Telefonzentrale, verbunden werden können. Jeder Teilnehmer hat dabei die Möglichkeit, sich mit jedem anderen Apparat verbinden zu lassen.

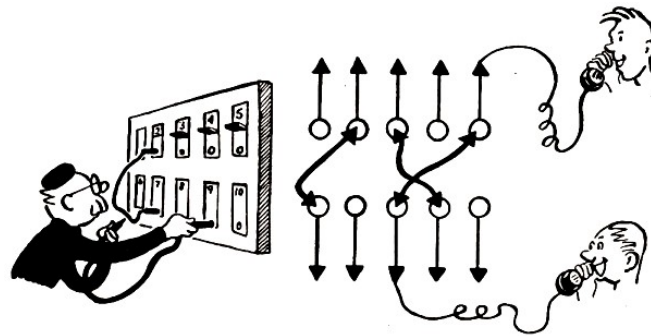


Bild 11.5.: Der Telefonschaltschrank war das erste komplizierte Signalsystem, das seine Struktur während des Arbeitsprozesses auf Grund eingegebener Informationen ändert.

Darin liegt eine Unbestimmtheit, die durch einen besonderen Befehl - die Adresse beseitigt werden muss. Diese Adressen werden gewöhnlich in Form einer Dezimalzahl (der Telefonnummer) angegeben.

Die Ausführung des Befehls lag bekanntlich in den Händen der vielen "Telefonfräulein", die in schrecklicher Eile, unter den Rufen der ungeduldigen Teilnehmer, die Verbindungen herstellten.

Damit war zum ersten Mal ein technisches Signalsystem geschaffen worden, das seine Struktur (und demzufolge seine Eigenschaften) unter der Einwirkung der bei ihm einlaufenden Information ständig ändert.

Mit der Vergrößerung der Anzahl der Teilnehmer und der Erweiterung der Netze entstand die Notwendigkeit, die Herstellung der gewünschten Verbindungen zu automatisieren. Das Ergebnis der Bemühungen vieler Erfinder und Ingenieure waren die automatischen Telefonzentralen. Dazu mussten zum einen die Telefonapparate mit einfach zu bedienenden Kodiergeräten ausgestattet werden, die die "Adressen" aus dem traditionellen Dezimalsystem in eine Folge von elektrischen Impulsen umwandeln, und zum anderen Effektoren, d. h. Schalter, entwickelt werden, die auf Grund dieser Impulsfolge automatisch die gewünschte Verbindung herstellen.

Die jedem bekannte Wählerscheibe der Telefonapparate bildet den Eingang dieses Kodiergerätes - beim Entspannen der durch "Wählen" einer Dezimalziffer gespannten Feder erzeugt der Mechanismus eine Impulsfolge, deren Länge von der gewählten Ziffer abhängt:

die Nummer 50 65 99 zum Beispiel wird in der Form 11111 - 11111111111 - 111111 - 11111 - 1111111111 - 1111111111 übertragen.

Die erste Impulsserie, die der ersten Ziffer der Adresse entspricht, kann die Unbestimmtheit in Bezug auf die Frage beseitigen, mit welcher von höchstens zehn automatischen Zentralen der Teilnehmer verbunden werden will.

Gibt es im Netz mehr Zentralen, so müssen zur Auswahl einer dieser Zentralen weitere Ziffern der Adresse herangezogen werden. Der Automat, der die Arbeit der Telefonzentrale regelt, verbindet den Apparat mit einem freien Vermittlungsautomaten, wenn das Signal eintrifft,

dass eine Verbindung gewünscht wird, und das geschieht beim Abnehmen des Hörers von der Gabel:

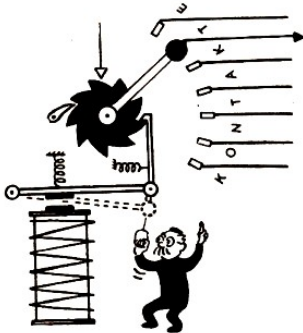


Bild 11.6.: Das Hauptelement der automatischen Telefonzentrale ist der dezimale Schrittschalter. Je nach der Anzahl der Impulse, die an seinen Elektromagneten gelangen, stellt er die Verbindung zu einer bestimmten Leitung her.

Ein Vermittlungsautomat ist ein elektromagnetischer Schalter mit zehn Schaltstellungen. Dieser geht in den fünften der zehn möglichen Zustände über, er schließt den Kontakt „5“, wenn er die Impulsfolge 11111 erhält.

Praktisch wird das dadurch erreicht, dass der Anker eines Relais von einem Elektromagneten fünfmal angezogen wird, ein Sperrrad sich um fünf Zähne weiterdreht - und eine Kontaktleiste von der Nulllage zu dem fünften Kontakt übergeht. Die Leitung vom fünften Kontakt führt zu einer bestimmten anderen Zentrale, und die ankommenden Signale der Adresse beseitigen die Unbestimmtheit in fünf weiteren dezimalen Schaltern, die in dieser Zentrale stehen.

Heute ist in allen großen Telefonnetzen die manuelle Verbindung vollständig beseitigt, und die "Telefonfräulein" bedienen nur noch kleine Ortsnetze und einen Teil des Fernverkehrs zwischen den Ortsnetzen.

Ein Mensch, der zum ersten Mal eine automatische Telefonzentrale besucht, ist von der Vielzahl und der Gleichartigkeit der Vermittlungsautomaten überrascht. Die Telefonzentrale besitzt ein umfangreiches "Gedächtnis", denn ihr Zustand verkörpert in jedem Moment alle Adressenkombinationen, die die Sprechenden geschickt haben. Dieses Signalsystem ist jedoch zu logischen Operationen nicht fähig, es ist nicht in der Lage, andere Signale wahrzunehmen als die Drehungen der Scheiben, und seine Operationsgeschwindigkeit ist gering.

Eine neue Revolution auf dem Gebiet der Nachrichtentechnik war die Entwicklung des Funks.

Im Jahre 1888 entdeckte Heinrich Hertz die elektromagnetischen Wellen, aber er sah keine praktischen Anwendungen seiner Entdeckung. A. S. Popow (1859-1906) bewies 1895, dass es möglich ist, elektromagnetische Wellen als Signale zur Informationsübertragung zu verwenden. Die praktisch wichtigste und beeindruckendste Seite der Funktechnik besteht im Fehlen spezieller Kanäle für die Informationsübertragung, im Fehlen von "Drähten" (man bezeichnet den Funk daher auch als "drahtlose Telegrafie" oder "drahtlose Telefonie").

Betrachten wir die Bauelemente, aus denen funktechnische Geräte konstruiert sind, so stellen wir noch etwas anderes fest. Die Funktechnik verwendet steuerbare Elemente, die auf anderen physikalischen Effekten beruhen und daher auch anders arbeiten als Relais und Kontakte. Bei der praktischen Anwendung dieser physikalischen Effekte eröffnete sich ein neuer Bereich in der Technik, der den Namen Elektronik erhielt.

Die normalen Leiter und Isolatoren sind Materialien mit einer konstanten Leitfähigkeit, die durch die Anzahl der freien aus den Atomhüllen herausgerissenen Elektronen in diesem Material bestimmt ist. In Metallen gibt es freie Elektronen in großer Anzahl. Daher leiten Metalle den Strom gut - sie bilden "Leiter". In Glas, Gummi, Ebonit und Plasten sind die Elektronen fest gebunden, diese Materialien leiten schlecht - sie bilden Isolatoren.

Physiker entdeckten, dass zwei Medien unter gewissen Bedingungen eine dynamische, variable Leitfähigkeit zeigen können, nämlich gewisse Kristalle (Halbleiter) und das Hochvakuum. Nach

den verwendeten Medien unterteilt man daher die Elektronik in die Zweige "Vakuumtechnik" und "Halbleitertechnik".

Der Übergang zu elektronischen Baueinheiten ermöglichte es vor allem, die Arbeitsgeschwindigkeit der Signalsysteme ungeheuer zu vergrößern: Millionen von Operationen werden in einer Sekunde ausgeführt!

Elektronische Filter und Verstärker übertreffen die alten (elektromechanischen) Schaltungen auch in allen anderen Merkmalen: in der Auswahlfähigkeit, der Empfindlichkeit, der Rentabilität und der Kompaktheit. Die Fähigkeit des "Elektronengases", nahezu trägheitslos auf Änderungen der Umweltbedingungen zu reagieren, wird in vielen Signalwandlern benutzt, deren Empfindlichkeit jene des "Ionengases" in den lebenden Zellen und damit jene unserer Sinnesorgane übertrifft.

Im Jahre 1873 entdeckte der Physiker W. Smith, dass eine Selenplatte ihren Widerstand ändert, wenn Licht auf sie fällt. Später fand man, dass in der Berührungszone eines dünnen Metallfadens und eines Kristalls Bedingungen vorliegen, unter denen elektrischer Strom nur in einer Richtung fließen kann. Es liegt also eine Art Ventil vor.

Die Funktechnik wendete diesen Effekt im Kristalldetektor an, einem Gerät zur Gleichrichtung elektrischer Schwingungen. Der sowjetische Funktechniker O. K. Lossew untersuchte die Eigenschaften des Kristalldetektors und bewies 1922, dass analoge Kristallgeräte auch als Verstärker und Relais dienen können.

Die Gesetzmäßigkeiten der Prozesse in Halbleitern waren jedoch zu dieser Zeit noch völlig ungeklärt. Daher errangen die Vakuumgeräte, die etwas später erfunden wurden, zeitweilig eine Vorrangstellung in der Elektronik.

Im Jahre 1884 baute Edison den Vakuumgleichrichter, die Diode. Bei seiner Arbeit an der Vervollkommnung der elektrischen Glühlampe stellte er fest, dass ihr erhitzter Faden Elektronen aussendet.

Er untersuchte eine Glühlampe, in deren Kolben sich eine Elektrode befand, von der eine Zuleitung nach außen führte. Ein Messinstrument, das er einerseits an diese Elektrode, andererseits an eine der Zuleitungen zum Glühfaden anschloss, zeigte an, dass in dem Stromkreis Glühfaden - Elektrode - Messgerät - Glühfaden ein elektrischer Strom floss, solange der Glühfaden erhitzt war.

Dieser Strom kommt dadurch zustande, dass aus dem heißen Glühfaden Elektronen ausgeschleudert werden, wodurch der Glühfaden positiv geladen wird. Der größte Teil der Elektronen kehrt durch die Anziehungskraft dieser positiven Ladung zum Glühfaden zurück, ein kleiner Teil gelangt jedoch bis zur Elektrode und lädt diese negativ auf.

Beim Ausgleich dieser Potentiale entsteht der von Edison gemessene elektrische Strom, dessen Stärke von verschiedenen Faktoren abhängt: Güte des Vakuums, Abstand der Elektrode vom Glühfaden, von dessen Material und Temperatur.

Führt man eine Batterie in den Stromkreis so ein, dass ihr positiver Pol an der Elektrode liegt, dann ist der Strom merklich stärker, weil jetzt - durch die Anziehungskraft, die die nunmehr positiv geladene Elektrode auf die Elektronen ausübt, ein weit größerer Teil der Elektronen zur Elektrode gelangt. Da die Elektrode (die Anode genannt wird) normalerweise keine Elektronen emittiert, kann der Strom nur in einer Richtung durch die Diode fließen, nämlich in der Richtung, die durch den Elektronenstrom vom Glühfaden (der Katode) zur Anode gegeben ist. Die Vakuumdiode bildet damit ein Modell der dynamischen Polarität der Nervenfasern.

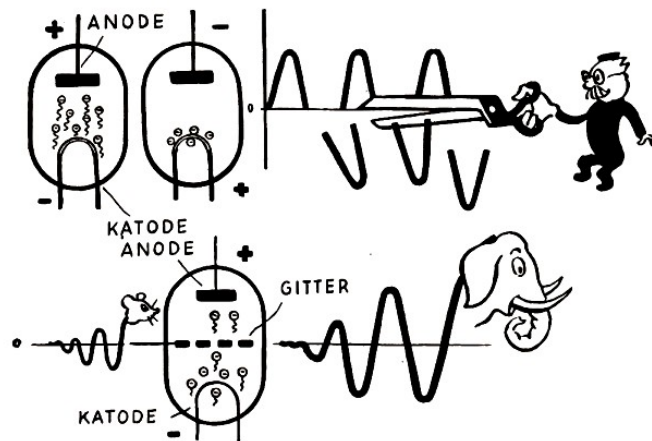


Bild 11.7.: Die ersten und wichtigsten Elektronenröhren: die Gleichrichterröhre mit zwei Elektroden, die "Diode"(oben), und die Verstärkerröhre, die "Triode" (unten). Die Diode ähnelt einem Ventil, die Triode einem Absperrhahn einer hydraulischen Einrichtung.

Die Vakuumtechnik entwickelte sich in mehrere Richtungen, die sich mit der Steuerung der elektrischen Ströme durch elektrische Ströme, durch Licht und Signale anderer Energieformen und der Umwandlung elektrischer Signale in Signale anderer Arten befassen.

Im Jahre 1906 führte der Ingenieur de Forest in eine Diode zwischen Anode und Katode eine dritte Elektrode - das Steuergitter - ein. Die so konstruierte Elektronenröhre erhielt die Bezeichnung Triode (Vakuumröhre mit drei Elektroden). In einer Triode müssen die Elektronen auf ihrem Weg von der Katode zur Anode durch das Gitter hindurch.

Daher beeinflusst eine zwischen Gitter und Katode angelegte Spannung die Stärke des Elektronenstroms. Ist das Gitter relativ zur Katode positiv geladen, dann werden die Elektronen vom Gitter angezogen - sozusagen von der Katode abgesaugt -, sie fliegen rascher, der größte Teil fliegt durch das Gitter hindurch und gelangt zur Anode (an die man im allgemeinen eine größere positive Spannung anlegt als an das Gitter). Die Stromstärke im Anodenstromkreis (Katode - Anode - Batterie - Katode) ist hoch.

Ist das Gitter dagegen relativ zur Katode negativ geladen, so werden die Elektronen von ihm abgestoßen. Bei hohen negativen Gitterspannungen hört der Elektronenfluss zwischen Katode und Anode ganz auf - die Triode ist gesperrt. Die Gitterspannung steuert also die Stärke des Stroms im Anodenstromkreis. Verhältnismäßig geringe Schwankungen der Gitterspannung führen zu starken Stromschwankungen im Anodenstromkreis, die Triode kann als Verstärker arbeiten.

Im Jahre 1918 verband der sowjetische Elektroingenieur M. A. Bontsch-Brujewitsch die Anoden zweier Trioden mit ihren Gittern so, dass zwei Rückkopplungen entstanden. Das so konstruierte Gerät, der elektronische statische Trigger, besitzt zwei klar zu unterscheidende stabile Zustände:

Der eine Zustand ist dadurch charakterisiert, dass die eine Triode Strom führt und die andere gesperrt ist; beim anderen Zustand liegen die Verhältnisse genau umgekehrt. Wenn ein Impuls in der gesperrten Röhre einen Strom hervorruft, dann wird die andere sofort gesperrt.

Der Impuls ruft, wie man sagt, ein Umkippen des Triggers aus einem stabilen Zustand in den anderen hervor. Der Trigger bildet also ein Modell für eine andere wichtige Eigenschaft der Neuronen, nämlich für ihre Eigenschaft, genau zwei Zustände annehmen zu können.

Diese Eigenschaft des Triggers kommt dadurch zustande, dass beim Übergang einer Röhre aus dem gesperrten in den leitenden Zustand das positive Potential an ihrer Anode fällt; das

führt zu einer Erhöhung des sperrenden negativen Potentials am Gitter der zweiten Röhre; die Sperrung der zweiten Röhre bewirkt eine Erhöhung des positiven Potentials an ihrer Anode und damit eine Erniedrigung des sperrenden Potentials am Gitter der ersten Röhre. Dieser Prozess läuft in Bruchteilen von Sekunden ab und ruft das Umkippen des Triggers hervor.

Der Trigger behält seinen Zustand so lange bei, bis er durch einen Impuls zu einer Änderung gezwungen wird. Folglich hat er die Eigenschaft, sich in einem gewissen Umfang - nämlich an einen Impuls - zu erinnern, d. h., man kann an seinem Zustand ablesen, ob er einen Impuls empfangen hat oder nicht.

Geringe Änderungen in der Schaltung des Triggers machen ihn zu einer Quelle gleichförmiger Impulse, zu einem Vibrator oder zu einem Gerät, das die Form von wenig verzerrten Impulsen wiederherstellt und damit nicht zu starke Störungen beseitigt.

Später fand man, dass man außer statischen Triggern auch dynamische Trigger konstruieren kann. Während der statische Trigger nur beim Wechsel seines Zustandes einen Impuls abgibt, erzeugt der dynamische Trigger in jedem Arbeitstakt einen Impuls, der seinem Zustand entspricht.

Der dynamische Trigger ist mit geringem Aufwand zu realisieren, beispielsweise mit einer Pentode. Eine Pentode ist eine Elektronenröhre, bei der zwischen Anode und Katode hintereinander drei Steuergitter angebracht sind. Zwei dieser Gitter werden durch eine Rückkopplung so verbunden, dass ein sperrender (negativer) oder öffnender (positiver) Impuls in diesem geschlossenen Kreis rhythmisch zirkulieren kann und im Anodenkreis eine Folge von Impulsen der anderen Art mit dem gleichen Rhythmus erzeugt.

Das Umkippen des dynamischen Triggers erfolgt durch ein Löschen des Impulses im Rückkopplungskreis, durch Einkoppeln eines entgegengesetzt wirkenden Impulses.

Der dynamische Trigger ist schon ein ziemlich genaues Modell eines Neurons mit Rückkopplung, d. h. eines Neurons, das sich mit seinen Endknoten selbst erregt. Die Existenz solcher Neuronen bzw. geschlossener Nervenbahnen ist bereits in den oben erwähnten Untersuchungen von McCulloch und Pitts vermutet und inzwischen von der Physiologie nachgewiesen werden. Wir hatten ferner erwähnt, dass beliebig komplizierte logische Beziehungen durch Schaltungen mit nur drei Typen von "Neuronen" realisiert werden können: "NICHT", "UND", "ODER".

Verhältnismäßig einfache Schaltungen mit Elektronenröhren bilden schnell arbeitende und zuverlässige Modelle dieser drei Elemente von Steuersystemen.

Betrachten wir ein Signalsystem, das mit binären Signalen in Form von gegenüber einem allgemeinen Bezugspunkt (der "Erde") positiven Spannungen arbeitet - die beiden Signalwerte sind also ein hoher und ein niedriger positiver Spannungswert.

Eine Schaltung, die die Negation realisiert, muss dann beim Anlegen der hohen Spannung an ihren Eingang die niedrige Spannung am Ausgang und umgekehrt liefern. Eine solche Schaltung - die Negator genannt wird - kann man mit einer Triode leicht aufbauen.

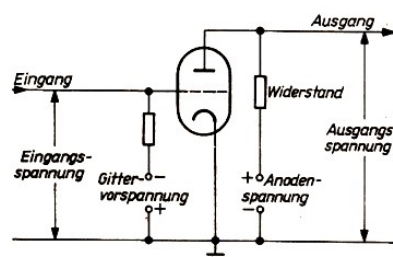


Bild 11.8.:

Das Prinzip zeigt die Abbildung 11.8.

Dem Gitter der Triode wird eine solche negative Spannung zugeführt, dass die Röhre beim Anlegen der niedrigen Signalspannung noch gesperrt ist. Bei gesperrter Röhre liegt an ihrer Anode (und damit am Ausgang der Schaltung) die volle Anodenspannung - der hohe Spannungswert. Wird dieser Spannungswert an den Eingang gelegt, dann wird die Röhre leitend, es fließt ein Strom im Anodenkreis, und durch den Widerstand in diesem Stromkreis wird ein Teil der Anodenspannung "vernichtet" - die Spannung am Ausgang sinkt auf den niedrigen Wert. Die Schaltung realisiert also tatsächlich die Negation.

Unter denselben Bedingungen kann eine die Konjunktion realisierende Schaltung mit einer Pentode aufgebaut werden. Das Prinzip ist aus der Abbildung 11.9. ersichtlich.

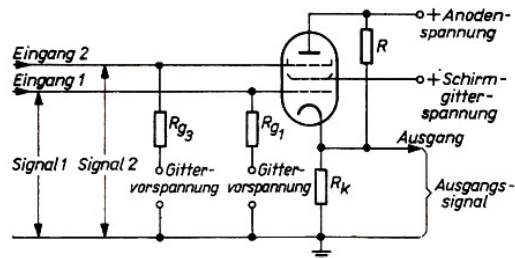


Bild 11.9.:

Den beiden als Steuergitter der Pentode benutzten Gittern (das erste und das dritte) werden solche Vorspannungen zugeführt, dass die Röhre nur dann leitend ist, wenn an beiden Eingängen die hohe Spannung liegt. Liegt also an wenigstens einem Eingang die niedrige Signalspannung, dann ist die Röhre gesperrt - ihr elektrischer Widerstand ist praktisch unendlich. Der Spannungsteiler  $R - R_K$  ist so dimensioniert, dass sich am Ausgang der Schaltung in diesem Fall der niedrige Spannungswert einstellt. Liegt an beiden Eingängen die hohe Spannung, dann wird die Röhre leitend, ihr Widerstand ist relativ klein. Dadurch steigt die Spannung am Ausgang der Schaltung auf den hohen Signalwert.

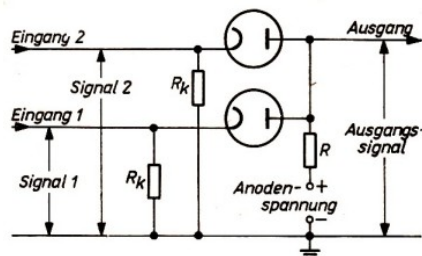


Bild 11.10.:

Man kann die Konjunktion auch durch eine Schaltung mit zwei Dioden realisieren, deren Prinzip der Abbildung 11.10. zu entnehmen ist.

Offenbar fließt bei dieser Schaltung nur dann kein Strom durch den Widerstand R, d. h., es liegt nur dann die Anodenspannung (der hohe Signalwert) am Ausgang der Schaltung, wenn an beiden Eingängen der hohe Signalwert liegt.

Anderenfalls besteht nämlich bei wenigstens einer Diode eine Spannung zwischen Anode und Katode, die einen Strom über den Widerstand R erzeugt, so dass ein Teil der Anodenspannung an diesem Widerstand "vernichtet" wird und sich der niedrige Signalwert am Ausgang einstellt.

Auch die Alternative kann mit zwei Dioden sehr einfach realisiert werden (Abb. 11.11.).

Am Ausgang dieser Schaltung tritt der hohe Signalwert offenbar dann und nur dann auf, wenn an wenigstens einem Eingang die hohe Spannung liegt.

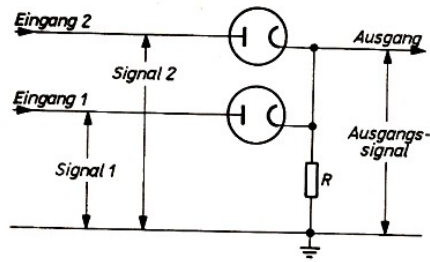


Bild 11.11.:

Abschließend wollen wir noch eine Schaltung eines "universellen" Bauelements in der Art des "Nicod-Neurons" angeben, nämlich eine Schaltung, die die Sheffer-Funktion realisiert (Abb. 11.12).

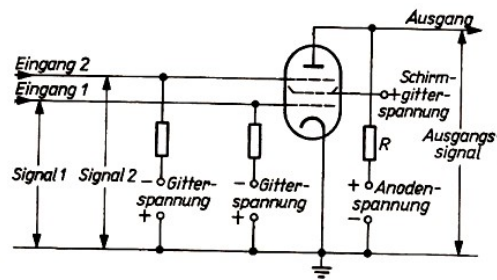


Bild 11.12.:

Die Gitter, zu denen die beiden Eingänge führen, erhalten eine solche Vorspannung, dass die Pentode dann und nur dann leitend wird, wenn an beiden Eingängen der hohe Spannungswert anliegt. Am Ausgang entsteht der niedrige Spannungswert genau dann, wenn die Röhre leitend ist, also genau dann, wenn an beiden Eingängen der hohe Signalwert liegt.

Die Schaltung realisiert also tatsächlich die Sheffer-Funktion, die ja den Wert F genau dann annimmt, wenn beide Argumente den Wert W haben. Da mit Hilfe der Sheffer-Funktion schon alle aussagenlogischen Verknüpfungen erzeugt werden können, kann man also jede Schaltung zur Realisierung einer logischen Verknüpfung allein aus Pentodenschaltungen der angegebenen Art aufbauen.

Ein zweiter Weg, der die Diode als Ausgangspunkt nahm, führte die physikalisch- technische Forschung zu Signalwandlern, die Lichtsignale in elektrische Signale umwandeln.

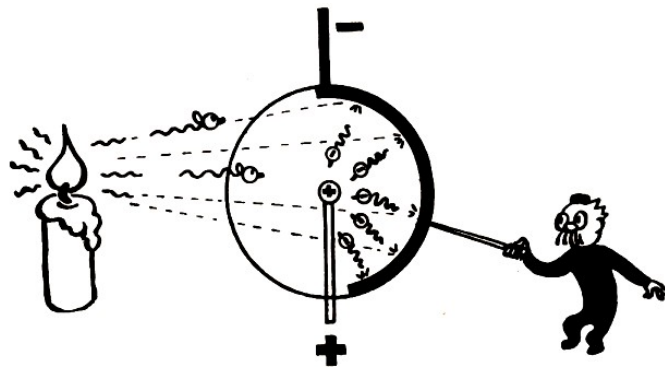


Bild 11.13.:. Die Umwandlung eindimensionaler Lichtsignale in elektrische Signale wird durch das Vakuumfotoelement verwirklicht. Die Lichtquanten schlagen beim Aufprall auf die Fotokatode aus dieser Elektronen heraus, die zur Anode fliegen und den Stromkreis schließen.

Die Untersuchungen des russischen Gelehrten A. G. Stoletow (1839 bis 1896) zeigten, dass auch eine kalte Katode Elektronen aussenden und den Widerstand des Vakuums erniedrigen



kann, wenn sie beleuchtet wird. Auf diesem Effekt basieren die lichtempfindlichen Vakuumröhren, die sogenannten Fotoelemente. Sie entsprechen in der realisierten Signalumwandlung den lichtempfindlichen Zellen, die den wesentlichen Teil der Sehorgane aller Lebewesen ausmachen.

Die Fotoelemente wurden vor allem zur Konstruktion von Apparaten benutzt, die in der Lage sind, zweidimensionale Lichtsignale (Abbildungen) automatisch in ein elektrisches Signal umzuwandeln ("Bildtelegraf").

Die ersten, sehr naiven Projekte solcher Apparate ahmten genau den Aufbau des Auges nach: Sie bestanden aus einer Menge von Fotoelementen, die je einen eigenen Kanal zur Übertragung des von ihnen abgegebenen Signals besaßen. Aber die Erfahrung zeigte, dass dieser hohe Aufwand überflüssig ist, dass man praktisch in allen Fällen damit auskommt, die einzelnen Bildteile nacheinander zu übertragen.

In den Jahren 1904 bis 1906 entstanden die ersten fototelegrafischen Wandler, die zur Bildzerlegung eine Schraubenfläche benutzten. Längs der Zeilen, in die das Bild zwecks Umformung in ein eindimensionales Signal zerlegt wird, bewegt sich jetzt kein Kontakt, sondern ein winziger Lichtpunkt. Das von dem Bild reflektierte Licht fällt auf ein Fotoelement, und da die reflektierte Lichtmenge der Helligkeit des jeweiligen Bildteils proportional ist, enthält die Folge der Stromstärkeänderungen, in die das Fotoelement die Helligkeitswerte umwandelt, das ganze Bild in kodierter Form.

Im Empfänger wird das elektrische Signal mit Hilfe einer trägheitslos arbeitenden Glimmlampe in ein eindimensionales Lichtsignal verwandelt. Dieses Signal wird dann auf eine Schraubenfläche projiziert, die mit der Schraubenfläche im Sender synchron läuft.

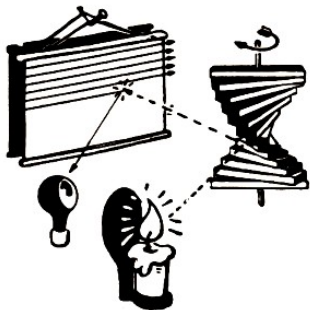


Bild 11.14.: Die automatische Bildzerlegung mit Hilfe eines laufenden Lichtstrahls, der von einer Spiegelschraube gelenkt wird, bildete bis zur Entwicklung elektronischer Bildzerlegungsgeräte eine relativ gute Lösung des Problems.

Bei Versuchen zur Übertragung von Bildern, die sich in natürlicher Weise bewegen, auf elektromagnetischem Wege, d. h. mit dem Beginn des Fernsehens, wurden vollkommeneren Übertragungsverfahren entwickelt. Ähnlich wie bei der Filmaufnahme zerlegte man das dreidimensionale Signal (eine zeitliche und zwei räumliche Dimensionen) zunächst in eine Folge von Einzelbildern (Signalen mit zwei räumlichen Dimensionen);

zur Übertragung eines jeden Einzelbildes zerlegte man es mit einer Nipkow-Scheibe<sup>45</sup> oder einer sogenannten "Spiegelschraube" in Zeilen.

Die Bildhelligkeit wurde dann zeilenweise, durch ein Fotoelement in Stromschwankungen umgewandelt, die zum Empfänger übertragen wurden. Im Empfänger wurden dann die umgekehrten Umwandlungen durchgeführt. Infolge der Trägheit des Sehvermögens wirkte die Folge nacheinander übertragener verschieden heller Punkte auf das Auge wie eine Menge gleichzeitig vorhandener Lichtpunkte, aus denen sich ein Bild zusammensetzt.

Diese mechanischen Bildzerlegungsverfahren lieferten keine guten Ergebnisse, und das sogenannte "mechanische Fernsehen" machte bald dem "elektronischen Fernsehen" Platz, bei dem

---

<sup>45</sup>Die Nipkow-Scheibe ist eine kreisförmige Scheibe, auf der spiralförmig Löcher angeordnet sind. Bei ihrer Rotation tastet jedes Loch eine Zeile ab - bei jeder Umdrehung der Nipkow-Scheibe wird also das ganze Bild einmal abgetastet.

die Bildzerlegung und -zusammensetzung mittels einer Weiterentwicklung der Diode, der Katodenstrahlröhre, vorgenommen wird.

Bevor wir das Fotoelement verlassen, wollen wir jedoch noch bemerken, dass es auch in fotoelektrischen Transmittern Anwendung gefunden hat. Das sind Geräte, die Lochungen eines Lochbandes ablesen und in elektrische Signale umwandeln, und zwar nicht mit Hilfe von Kontakten, sondern durch Lichtstrahlen, die durch die Löcher auf Fotozellen fallen. Die Verwendung eines Fototransmitters ermöglichte eine wesentliche Erhöhung der Lesegeschwindigkeit.

Die dritte wesentliche Weiterentwicklung der Vakuumdiode bilden die Katodenstrahlröhren, in denen Elektronen beschleunigt und zu einem Elektronenstrahl gebündelt werden, dessen Bewegung gesteuert werden kann. Wegen der geringen Masse der Elektronen kann man ihre Flugrichtung innerhalb sehr kurzer Zeit nahezu trägheitslos ändern. Zur Ablenkung der fliegenden Elektronen kann man elektrische oder magnetische Felder benutzen: Es genügt, seitlich vom Elektronenstrahl geladene Platten oder (Elektro-)Magnete anzubringen.

Unter Benutzung dieses Prinzips konstruierten die Ingenieure Dieckmann und Hell im Jahre 1925 das erste funktionsfähige elektronische Modell des Auges. Sie konstruierten ein Fotoelement mit einer ebenen Katode, die so dünn war, dass sie durchsichtig war.

Diese Fotokatode belichteten sie von der Rückseite - sie setzten die Katode an die Stelle des Films in einer Kamera. Diese Kamera bildete das Gegenstück zum Augapfel mit der Linse und Pupille, während die Fotokatode die Netzhaut des Auges vertrat.

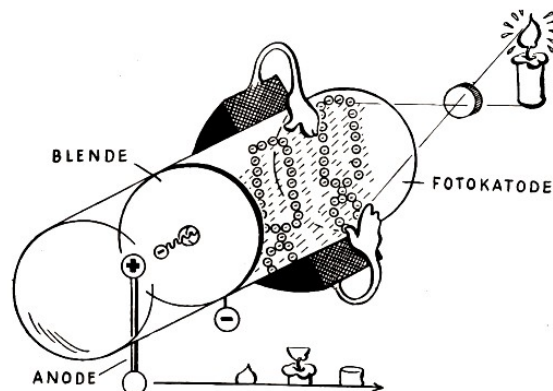


Bild 11.15.: Das "elektrische Auge" ist eine Weiterentwicklung des Fotoelements. Projiziert man auf eine Fotokatode mit Hilfe einer gewöhnlichen Optik ein Bild, so spiegelt sich dieses in der Verteilung der von der Katode ausgesendeten Elektronen wider. Wichtig ist, dass die Wege der Elektronen parallel verlaufen, dass sie sich nicht schneiden. Zur Bildzerlegung lässt man das ganze Strahlenbündel Schwingungen ausführen, so dass durch eine Blende der Reihe nach die einzelnen Punkte des elektronischen "Bildes" auf die Anode fallen. Das bewirken Elektromagnete. Die heutige Fernsehaufnahmeröhre tut das gleiche, sie sammelt aber die Elektronen des "Bildes" und ist daher empfindlicher.

In Abhängigkeit von dem durch das Objektiv projizierten Bild sendet nun jeder Punkt der Fotokatode mit einer bestimmten Intensität Elektronen aus. Um den Vakuumkolben brachten sie ablenkende Elektromagnete an, die so arbeiteten, dass die Bildzerlegungssignale alle Elektronen gleichzeitig als starkes Bündel ablenkten. In jedem Augenblick fiel auf die winzige Anode nur ein feiner Strahl aus dem ganzen Bündel.

Weil sich aber das ganze Bündel bewegte, fielen der Reihe nach alle Strahlen auf die Anode, und in dem Strom, der durch das "Auge" floss, waren der Reihe nach die Helligkeiten aller Teile des Bildes enthalten, das auf die Katode projiziert werden war.

Die Empfindlichkeit des "elektronischen Auges" von Dieckmann und Hell war aber im Vergleich zu einem gewöhnlichen Fotoelement sehr gering, weil der Elektronenstrom, den eine konkave Fotokatode im Brennpunkt sammelt, jetzt in eine Vielzahl von Strahlen zerlegt wurde, von denen jeweils nur einer den Strom leitete.

Eine Vervollkommnung des Geräts von Dieckmann und Hell ist möglich, wenn man ein Elektronenbündel verwendet, das von einer erhitzten Katode emittiert und mit Hilfe eines elektromagnetischen Feldes zu einem feinen Strahl gesammelt würde.

Schon im Jahre 1897 konstruierte der Physiker Braun ein Gerät zur Beobachtung schneller elektrischer Schwingungen, das Katodenstrahlosziloskop oder der Oszillograph genannt wurde. Es besteht aus einer konischen Vakuumdiode, in der die Anode durch eine Kohleschicht an den Seitenwänden ersetzt ist.

Die Elektronen, die die erhitzte Katode aussendet, werden durch die Anodenspannung beschleunigt und durch das elektromagnetische Feld einer Spule so gebündelt, dass sie an der Anode vorbei gegen die ebene Grundfläche des Konus fliegen, auf die eine Leuchtstoffschicht aufgetragen ist, d. h. eine Schicht, die unter Elektronenbeschuss aufleuchtet. Beim Aufschlagen auf den Leuchtstoff erzeugt der Elektronenstrahl im Mittelpunkt des Bildschirms einen leuchtenden Punkt.

Führt man nun dem Paar horizontal ablenkender Platten ein periodisches Signal zu, so zeichnet der Strahl eine horizontale Linie quer über den Bildschirm. Überträgt man aber gleichzeitig auf das Paar der vertikal ablenkenden Platten im Takt mit den periodischen Schwingungen noch die Schwingungen eines Potentials, so weicht der Strahl von der geraden Linie ab und zeichnet eine Kurve auf - die grafische Darstellung der Änderungen dieses Potentials in einer Schwingungsperiode.

Der Oszillograph ermöglicht es, sehr schnelle periodische Prozesse zu erfassen und zu untersuchen; er hält praktisch die Zeit an. Mit Hilfe von Signalwandlern kann man nämlich beliebige in der Natur auftretende Parameter von periodischen Erscheinungen und Prozessen in elektrische Schwingungen umwandeln: Änderungen des Drucks, der Temperatur, der Helligkeit, der Entfernung, die Strahlung der Elementarteilchen usw. Alle momentanen Änderungen, die in der Natur vor sich gehen, werden dank der Trägheitslosigkeit des Elektronenstrahls der Beobachtung zugänglich. Unter den natürlichen Rezeptoren, den von der Natur geschaffenen Sinnesorganen, gibt es nichts Ähnliches.

Im Laufe der Zeit erhielt die Braunsche Elektronenstrahlröhre viele "Konkurrenten" und "Weggefährten".

Wir betrachten nur diejenigen von ihnen, die eine direkte Beziehung zum Thema dieses Kapitels haben.

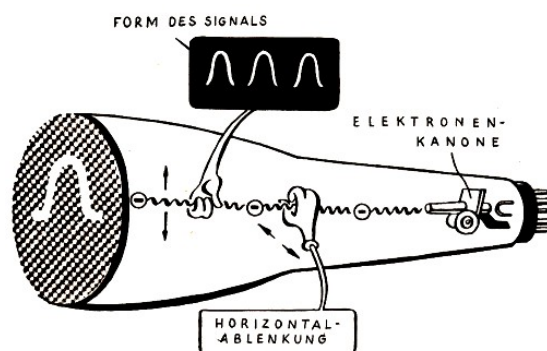


Bild 11.16.: Der Katodenstrahloszillograph besitzt eine konstante Elektronenstrahlquelle, eine



wurde.

Der gewöhnliche Katodenstrahloszillograph ermöglichte es, die Erregung der Zellen in den Nervenbahnen zu untersuchen. Es wurde bestätigt, dass jede Erregung von einer Änderung des elektrischen Potentials der Zelle begleitet wird, es treten Gruppen von Ionen in Wechselwirkung. Die Oszillogramme bestätigten, dass die Erregung dem Alles-oder-Nichts-Gesetz genügt. Aber erst der Elektronenstrahllokator machte es möglich, die Arbeit des Gehirns als Ganzes - wenigstens in großen Zügen - zu beobachten.

Das geschieht folgendermaßen. Einem Menschen, an dessen Kopf Signalwandler angebracht sind, wird ein mathematisches oder logisches Problem aufgegeben. Das Zimmer wird verdunkelt, und auf dem grünlichen Bildschirm des Lokators zeichnen sich matt die Umrisse des Gehirns ab. Plötzlich leuchten helle grüne Punkte auf: An der entsprechenden Stelle des Gehirns hat ein Wandler eine Erregung festgestellt.

Die Erregung verlagert sich, der leuchtende Punkt wandert. Die Erregung dehnt sich aus. Nun zeigt schon eine ganze Gruppe von leuchtenden grünen Punkten einen Bereich im Gehirn an, der im Augenblick elektrisch aktiv ist.

Schließlich ermöglichte es das Elektronenstrahlprinzip, das "elektrische Auge" zu vervollkommen und hochempfindliche Röhren zu entwickeln - Fernsehaufnahmeröhren, Röhren zur Informationsspeicherung - von denen später die Rede sein wird - und Röhren zur Kodierung von Informationen.

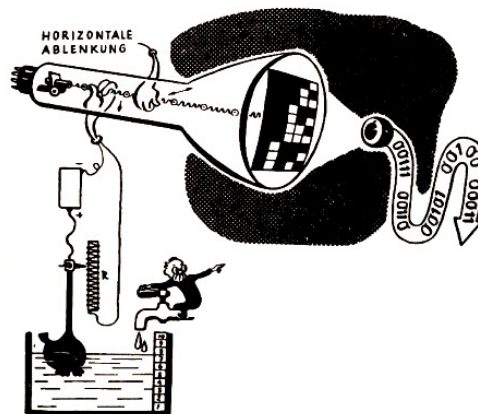


Bild 11.18.: Dieser Signalwandler wandelt ein stetiges Signal in ein binäres mit Hilfe eines Oszilloskop um. Jeder (vertikalen) Verschiebung der Zeile auf dem Bildschirm entspricht eine bestimmte Kombination von Löchern in der Maske. Beim Abtasten einer Zeile erhält das Fotoelement eine Serie von Hell- und Dunkelwerten, die es in ein binäres elektrisches Signal umwandelt. Welches Signal das Fotoelement abgibt, hängt von der abgetasteten Zeile der Maske, also von der Verschiebung der Zeile durch das Eingangssignal ab.

Die Konstruktion von Umkodierstrahlröhren basiert auf folgendem: Jedem Punkt auf dem Bildschirm entspricht ein bestimmter Signalwert am Steuersystem der Röhre, nämlich der Signalwert, der den Elektronenstrahl auf diesen Punkt lenkt und ihn aufleuchten lässt. Das Licht, das von den (nacheinander aufleuchtenden) Punkten ausgeht, kann man mit einem Kondensator sammeln und auf ein hochempfindliches Fotoelement leiten und so wieder in ein leicht zu übertragendes elektrisches Signal verwandeln. Der Bildschirm stellt dabei eine Karte dar, auf der jedem Punkt ein Signalwert entspricht.

Dabei kann umgekehrt jedem Signalwert eine ganze Menge von Punkten, z. B. eine halbe oder eine ganze Zeile entsprechen - beim Anlegen bestimmter Signalwerte an den Eingang leuchtet

ein Punkt, bei anderen eine ganze Zeile oder eine halbe Zeile auf.

Wenn man jedem Einzelsignal (Signalwert) eine ganze Zeile auf dem Bildschirm zuordnet (deren Punkte natürlich nacheinander aufleuchten) und den Bildschirm durch eine Maske abdeckt, die einen Teil der Bildpunkte für das Fotoelement verdeckt, dann wird jedes Einzelsignal durch das Fotoelement in Abhängigkeit von der gegebenen Maske in eine Folge von Stromstößen (sichtbare Punkte) und Pausen (verdeckte Punkte) umgeformt.

In Abhängigkeit von der gewählten Karte (der Darstellung der Signalwerte durch Mengen von Punkten auf dem Leuchtschirm) und der Maske - Abstufung ihrer Lichtdurchlässigkeit in mehr als zwei (z. B. zehn) Werte, Verteilung der einzelnen Durchlässigkeitsstufen über die Maske - lassen sich die verschiedensten Signalumwandlungen mit derselben Anlage relativ einfach durchführen. Insbesondere können so stetige Signale in diskrete, z. B. binäre, umgewandelt werden.

Eine der Hauptaufgaben von Signalsystemen ist die Beseitigung der Redundanz oder umgekehrt das Hineinbringen von Redundanz in einen Kode. Die Redundanz hängt, wie wir wissen, direkt mit der Wiederholung (der relativen Häufigkeit) der Signale zusammen.

Im Jahre 1952 schlug B. M. Oliver vor, die relative Häufigkeit der Einzelsignale, mit denen der gegebene Kode arbeitet, am Eingang des Steuersystems einer Umkodierungsrohre automatisch berechnen zu lassen und den Elektronenstrahl in Abhängigkeit von der relativen Häufigkeit der Einzelsignale an verschiedenen Stellen des Bildschirms abzulenken.

Vor dem Bildschirm sollten an diesen Stellen Masken unterschiedlicher Dichte angebracht werden, so dass sich die Stärke des Ausgangssignals entsprechend der relativen Häufigkeit der Eingangssignale ändert. Ist die Maske an jenen Stellen des Bildschirms, die häufigen Einzelsignalen entsprechen, dichter als an den Stellen, die seltenen Einzelsignalen entsprechen, so gibt das Fotoelement bei den seltenen Einzelsignalen, die ja mehr Information tragen als die häufigen, stärkere Stromstöße ab als bei den häufigen - die Stabilität der Übertragung erhöht sich.

Eine Braunsche Röhre, deren Bildschirm eine Karte sämtlicher möglichen Signalwerte darstellt, lädt die Stellen des Bildschirms, die den häufigsten Signalwerten entsprechen, stärker (negativ) auf als andere. Unter Ausnutzung dieses Effektes kann man Filter bauen, die Störungen aussieben, denn ein schwaches, aber wiederholt empfangenes Signal, das man vom Rauschen kaum mehr unterscheiden kann, zeichnet sich durch die Regelmäßigkeit der Wiederholung aus, während die Störungen eine zufällige Verteilung haben.

Die Berücksichtigung der relativen Häufigkeit von Einzelsignalen liegt auch anderen Operationen zugrunde, die man mit Signalen durchführen kann. Die Braunsche Röhre bildet daher den Hauptteil verschiedenartiger "stochastischer" Maschinen, deren erstaunliche Eigenschaften der Leser in den folgenden Kapiteln kennenlernen wird.

Unter Benutzung von schnellarbeitenden elektronischen Geräten ist es gelungen, viele Eigenschaften der Elemente lebender Steuersysteme isoliert zu modellieren, ohne die Ionenprozesse, die in den Zellen ablaufen, genau zu kennen. Einige natürliche Prozesse wurden dabei sogar an Schnelligkeit und Genauigkeit übertroffen.

Man kann jedoch leicht feststellen, dass die Natur in ihrer Sparsamkeit bisher unerreicht blieb. Ein mit Elektronenröhren aufgebauter Trigger zum Beispiel ist in seinen Ausmaßen unvergleichlich größer als eine Nervenzelle und verbraucht eine große Energiemenge. Überdies ist er störanfälliger gegenüber mechanischen Einwirkungen, durch Schläge und Erschütterungen wird er beschädigt oder zerstört.

Die Elektronenröhren besitzen neben ihren Vorzügen auch wesentliche Nachteile, von denen insbesondere der unproduktive Energieverbrauch für die Katodenheizung zu nennen ist. Man suchte daher nach anderen physikalischen Effekten, die es ermöglichen, elektrische Ströme durch elektrische Ströme zu steuern. Diese Effekte fand man bei der Untersuchung verunreinigter Kristalle verschiedener Stoffe.

Die einfachsten Anwendungen von Halbleitern hingen damit zusammen, dass beim Halbleiter die Anzahl der freien Elektronen unter dem Einfluss äußerer Einwirkungen verändert werden kann. Ein erhitzter oder beleuchteter Halbleiter verringert seinen Ohmschen Widerstand und kann als Signalwandler oder Rezeptor fungieren, er kann ein Thermometer oder ein Vakuumfotoelement ersetzen.

Die Stärke des Stromes durch einen Halbleiter ändert sich bei einer Erhöhung der Spannung anders als die eines Stromes durch einen Leiter, d. h., sie folgt dem Ohmschen Gesetz nicht. Vergleicht man den Halbleiterwiderstand mit dem gewöhnlichen, so scheint es, als wäre seine Länge oder sein Querschnitt variabel. Das benutzt man zur Umformung von Signalen, z. B. von Messergebnissen, in "Varistor"-Geräten.

Kompliziertere Erscheinungen, die in Halbleitern vor sich gehen, führten die scharfsinnigsten Forscher mehrmals in eine Sackgasse. Der Physiker Hall stellte 1879 fest, dass ein Magnetfeld einen Elektronenstrom in einem festen Körper ungefähr ebenso ablenkt wie einen Elektronenstrahl im Vakuum, nur mit geringerem Effekt.

Bei Halbleitern beobachtete man in einigen Fällen eine Verschiebung der Ladungsträger, die der von der Theorie für negative Elementarladungen, d. h. Elektronen, vorausgesagten Verschiebung direkt entgegengesetzt war. Nach außen hin schien es, als gäbe es im Halbleiter "positive Elektronen".

In der Tat gibt es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen, und insbesondere entspricht dem Elektron tatsächlich das Positron, ein analoges Teilchen mit positiver Ladung. Aber die Existenz von Positronen in einem Halbleiter ist äußerst unwahrscheinlich, da sich Positronen und Elektronen bei ihrem Zusammentreffen unter Umwandlung in Energie "zerstrahlen". Eine spontane Energieabgabe wurde bei Halbleitern aber nie beobachtet.

Die Untersuchungen zeigten, dass sehr kleine Zusätze fremder Stoffe die Eigenschaften eines Halbleiters völlig verändern, und bei fast allen Halbleitern erhöhte sich nach einer solchen "Verunreinigung" die elektrische Leitfähigkeit wesentlich, allerdings je nach der Zusammensetzung des Zusatzes, für die eine oder die andere Stromrichtung.

Werden Stoffe zugesetzt, bei denen die äußeren Schalen der Atome mehr Elektronen enthalten als bei dem Halbleiter selbst, so werden aus verschiedenen Gründen tatsächlich wie bei Metallen Elektronen frei. Hat jedoch der Zusatz weniger äußere Elektronen, so werden die freien Elektronen des Halbleiters von den benachbarten Atomen des Zusatzes gebunden, sie können sich also nicht frei bewegen.

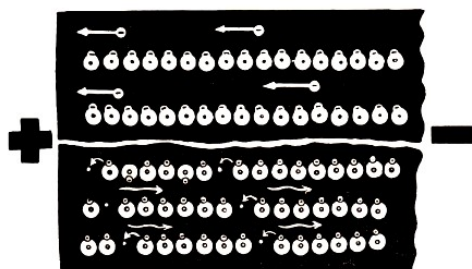


Bild 11.19.: In einem Halbleiter lässt sich der elektrische Strom wie im Vakuum leicht steuern. Die Träger des elektrischen Stroms können je nach dem Material des Halbleiters entweder wie im

Vakuum Elektronen sein (siehe oben) oder "Lücken", d. h. Stellen, an denen im Kristallgitter des Stoffes Elektronen fehlen (siehe unten).

Was sich bewegt und dadurch den Strom leitet, das sind die sogenannten "Lücken", d. h. die Stellen, an denen Elektronen fehlen: diese Stellen kann man unter Vorbehalt als Teilchen mit positiver Ladung auffassen.

Halbleiterbauelemente bestehen gewöhnlich aus zwei oder mehreren Schichten eines Stoffes, die sich durch die Art ihrer Leitfähigkeit unterscheiden. Als erste fanden Halbleiterdioden eine breite Verwendung. Im Jahre 1948 entwickelten die Physiker Bardeen und Brattain eine Halbleitertriode, die die Bezeichnung Transistor erhielt.

Wie die Vakuumtriode hat ein Transistor drei Elektroden: Eine spielt die Rolle der Katode, sie sendet Elektrizitätsträger aus und wird als Emitter bezeichnet; eine andere hat die Funktion der Anode, sie nimmt die Elektrizitätsträger auf und wird als Kollektor bezeichnet; die dritte Elektrode schließlich spielt die Rolle des Gitters, und man bezeichnet sie als Basis des Transistors.

Über die gemeinsame Basis sind die beiden Stromkreise des Transistors, nämlich der Basis-Emitter-Kreis und der Kollektor-(Basis-)Emitter-Kreis miteinander verkoppelt. Eine Erhöhung der Stromstärke im Basis-Emitter-Kreis bewirkt eine Erhöhung der Stromstärke in dem anderen Kreis. diese Erhöhung verstärkt den Strom im Basis-Emitter-Kreis.

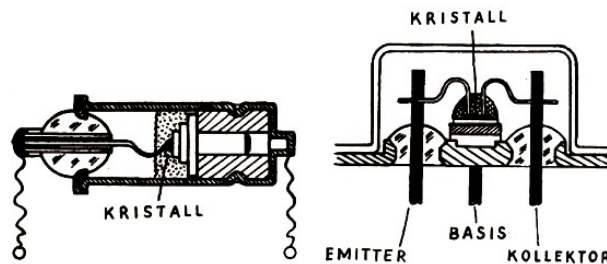


Bild 11.20.: Die Halbleiterdiode (oben) und die Halbleitertriode (Transistor) zeichnen sich durch geringe Größe, niedrigen Energieverbrauch und hohe Lebensdauer aus.

Die industrielle Herstellung von Transistoren war ein sehr großer Erfolg: denn seither ist es möglich, im großen Maße Elektronenröhren durch die viel sparsameren und kleineren Transistoren zu ersetzen.

Es muss hier bemerkt werden, dass in der letzten Zeit zahlreiche Konkurrenten für die Halbleiterbauelemente entstanden sind; dazu gehören das Kryotron, die Molekularverstärker und das Solion.

Das Kryotron ist ein Leiter, den eine feine Spule umgibt und der auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt ist. Nahe dem Nullpunkt beobachtet man die sehr interessante Erscheinung der Supraleitfähigkeit: Ein Metall verliert beim Abkühlen unter eine gewisse Temperatur (der Sprungtemperatur) seinen Ohmschen Widerstand, und zwar vollständig. Es zeigte sich, dass die Stromstärke in dem Leiter, dessen Temperatur nur wenig über der Sprungtemperatur liegt, bei einer geringen Änderung der Stromstärke in der Spule ungeheuer wächst, da sich die Sprungtemperatur bei einer Änderung der Feldstärke etwas verschiebt. Wenn es praktisch gelingt, Signalsysteme, die nach dem Prinzip des Kryotrons arbeiten, zuverlässig abzukühlen, dann ist es möglich, noch kleinere und leistungsfähigere Systeme zu bauen.

Die auf der Basis von Ionenprozessen arbeitenden Signalwandler, die Solionen, befinden sich noch im Versuchsstadium. Sie werden voraussichtlich die elektronischen Geräte in bezug auf



die Arbeitsgeschwindigkeit, die Stabilität der Kennlinien und andere Merkmale kaum jemals praktisch übertreffen.

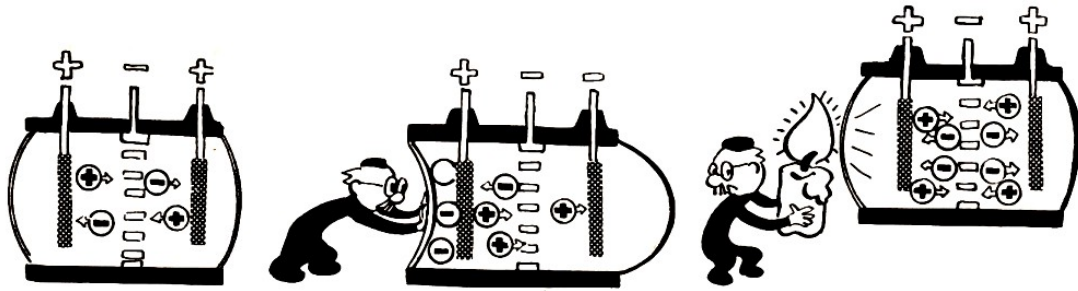


Bild 11.21.: Das Solion besteht aus einer mit einem Elektrolyten gefüllten Kapsel, einer porösen mittleren Elektrode und zwei gewöhnlichen Elektroden. Das Solion kann als Druckrezeptor, als Mikrofon, als Fotoelement, als Motor, als Relais, als nichtlinearer Verstärker und als Gedächtniselement verwendet werden.

Aber vom Standpunkt der Kybernetik gesehen sind die Solionen besonders interessant, weil sich in ihnen Prozesse der gleichen physikalischen Art abspielen wie in den lebenden Neuronen.

Man stelle sich eine mit einer Lösung von Jod und Natriumjodid gefüllte Kapsel mit elastischen Wänden vor, in der drei Metallelektroden in einer Reihe angeordnet sind, von denen die mittlere die Kapsel in zwei Hälften teilt, jedoch porös ist, so dass Ionen aus einer Hälfte der Kapsel in die andere gelangen können. Das ist ein Solion.

Die äußeren Elektroden sind die Anode bzw. die Katode, die mittlere spielt die Rolle des Gitters der Vakuumtriode. Die Konzentration der Ionen in einer Lösung hängt bekanntlich von ihrer Temperatur und von der Bestrahlung ab.

Bei einer Erhöhung der Temperatur oder der Helligkeit vergrößert sich die Leitfähigkeit der Lösung - man kann das Solion als Wärmerezeptor und als Fotoelement verwenden. Übt man auf eine biegsame Wand des Solions einen Druck aus, so wölbt sie sich nach innen, die Lösung wird durch die poröse Elektrode hindurchgedrückt, und die Leitfähigkeit des Geräts ändert sich; das Solion wirkt so als Druckrezeptor (Spannungsrezeptor) und kann auch als Mikrofon verwendet werden.

Ein an die mittlere Elektrode gelegtes Potential steuert den Durchgang der Ionen von der Katode zur Anode, das Gerät verstärkt also elektrische Signale, die in Form von Potentialschwankungen vorliegen. Das Solion wirkt so als Verstärker und Relais.

Darüber hinaus können wir durch eine Erhöhung des Potentials der mittleren Elektrode die Lösung aus einer Hälfte des Geräts in die andere verlagern. Dabei zieht sich die eine elastische Wand zusammen, während sich die andere ausdehnt; es vollzieht sich eine Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische, das Solion wird zu einem Motor.

Man stelle sich eine Konstruktion wie die elektronische Schildkröte von Grey Walter, nur aus Solionen bestehend, vor, und zwar aus vielen verschiedenen konstruierten Modifikationen des Solions.

Sie kann Nahrung von galvanischen Elementen oder Akkumulatoren erhalten, die in ihrem Aufbau den Solionen sehr ähnlich sind. Handelt es sich um galvanische Elemente, so muss das System, um existieren zu können, verdorbene Elektroden herauswerfen und sie und die Lösung (den Elektrolyten) durch neue ersetzen, d. h. einen Stoffwechsel durchführen.

Wenn die ernährenden Elemente wie Akkumulatoren arbeiten können, so werden die Bedürfnisse allein durch einen Energieaustausch befriedigt: Das System erhält elektrische Energie und

verwandelt sie bei allen Bewegungen in Wärme.

Um sich die notwendigen Stoffe oder die Energie zu verschaffen, kann sich die Solionenschildkröte bewegen, kann sie Druck, Schall, Licht, Wärme oder Kälte wahrnehmen und in bestimmten Elementen Information aufbewahren und verarbeiten. Ihr Verhalten kann (für sie) höchst zweckmäßig sein, und da in jedem Solion physikalisch gesehen die gleichen Prozesse vor sich gehen wie bei den semipermeablen Zellwänden eines lebenden Organismus, ist die Frage durchaus berechtigt, ob man die Schildkröte nicht als lebend bezeichnen darf.

Offensichtlich nicht, da die Solionen beispielsweise nicht die Fähigkeit haben, sich selbst zu reproduzieren, und keine Vererbung kennen. Je näher wir der experimentellen Nachbildung verschiedener Seiten des Lebens kommen, desto mehr Grund haben wir, ein System nur dann als "lebend" zu bezeichnen, wenn es ohne Ausnahme alle Eigenschaften eines lebenden Organismus hat.

In ihrem Handeln kann man aber die Solionenschildkröte nicht von einer lebenden unterscheiden, und in ihrem Aufbau verkörpert sich ein sehr hoher Grad der Organisation der Materie. Recht seltsam und inkonsequent klingt daher die Behauptung, aus der Technik entlehnte Elemente - Signalwandler, die z. B. mit Elektronen oder Ionen arbeiten - könnten "niemals" ein so vollkommenes Signalsystem, wie es das Gehirn ist, bilden.

So schrieb vor kurzem ein angesehener Autor (P. Guljajew):

"Wir müssen zwischen der Großhirnrinde des Menschen und allen technischen Einrichtungen, zu denen auch das Fernsehgerät zählt, einen prinzipiellen Unterschied machen. In einer technischen Einrichtung sind alle Prozesse im Eingang, in den Zwischengliedern und im Ausgang stets physikalische Prozesse, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen. ... In der Großhirnrinde dagegen entsteht ein psychischer Prozess, der qualitativ anderen Gesetzen unterliegt."<sup>46</sup>

Diese Überlegung ist im höchsten Maße charakteristisch für die "Begründung" der kategorischen Einschränkung von Modellierungsmöglichkeiten für psychische Prozesse. Solche Ansichten - und sie werden bis heute von Zeit zu Zeit geäußert - haben ihren Ursprung in der sehr alten und völlig falschen Vorstellung, dass die komplizierteren und höheren Gesetzmäßigkeiten nicht durch kompliziertere Kombinationen gewöhnlicher einfacher Wechselwirkungen zwischen elementaren Prozessen in der Natur entstehen, sondern dadurch, dass auf jeder höheren Stufe zu den Erscheinungen der früheren Stufen eine besondere "Substanz", ein besonderer Stoff oder eine besondere Energie hinzugefügt wird.

Die Arbeit jeder Röhre, jedes Widerstands und jedes Kondensators in einem Fernsehgerät unterliegt zweifellos den physikalischen Gesetzen der Elektrodynamik. Aber aus keinem Gesetz der Elektrodynamik folgt der Aufbau des Fernsehgeräts als Ganzes, die Schaltung von der Antenne über eine Reihe von Verstärkern bis zur Bildröhre und zu den Lautsprechern.

Eine Radoröhre kann uns zweifellos nicht zeigen, was in einem Fernsehstudio vor sich geht, und sie kann keinen Auszug eines englischen Textes ins Russische übersetzen. Auch zweihundert oder zweitausend Röhren haben diese erstaunlichen Eigenschaften nicht, wenn man sie in Reihe schaltet. Sind sie aber in einer bestimmten Weise organisiert, bilden sie ein Fernsehgerät oder eine elektronische Rechenmaschine, so zeigen sie neue Eigenschaften, die man nicht mehr aus den alten, rein physikalischen Gesetzen ableiten oder auf diese Gesetze "zurückführen" kann, ohne dem Sinn der Begriffe grobe Gewalt anzutun.

Bei einer Übersetzung aus einer Sprache in eine andere arbeitet eine elektronische Maschine

---

<sup>46</sup>Die Anwendung mathematischer Methoden in der Biologie, 1960, S. 184.

nicht nach den Gesetzen der Elektrodynamik, sondern nach den Gesetzen der Sprache, und wenn sie diese Gesetze nicht beherrscht, so kann sie nicht übersetzen.

In den Elementen eines nicht intakten oder nicht abgestimmten Fernsehgeräts genügen alle physikalischen Prozesse den physikalischen Gesetzen ganz genauso wie in einem intakten, es wird kein Gesetz verletzt, aber es besteht nicht die "richtige" Wechselbeziehung zwischen den Elementen, das Fernsehgerät arbeitet nicht.

Bis heute begegnet man hin und wieder der seltsamen Vorstellung, dass sich "die chemischen Elemente, die zum Bestand von etwas Lebenden gehören, in einem qualitativ anderen Zustand befinden als in der anorganischen Natur".<sup>47</sup> Das ist natürlich falsch; "nicht lebender" Sauerstoff oder Stickstoff unterscheidet sich durch nichts von dem Sauerstoff bzw. Stickstoff, der in den Geweben eines Organismus gebunden ist.

Es handelt sich wiederum nicht um die Eigenschaften oder Zustände der Elemente, sondern um die Eigenschaften von Systemen, zu denen sie vereinigt sind. Schon die Materialisten der Antike hatten das gut verstanden. Lukrez schrieb:<sup>48</sup>

"... Und kann lachen, was nicht aus lachenden Stoffen besteht,  
Klug sein, klaren Verstand und Gewandtheit zeigen im Ausdruck,  
Was aus Stoffen besteht, die beredt nicht sind, noch verständig:  
Könnten denn andere Dinge, die wir mit Empfindung begabt sehen,  
Nicht aus Elementen bestehen, die ohne Gefühl sind?"

Eine Zelle des Gehirns besitzt weder Verstand noch Redegewandtheit, eine Zelle des Gehirns unterliegt nicht psychischen Gesetzen, sondern diese Gesetze entstehen im Gegenteil erst durch die Wechselwirkung der Zellen untereinander, und nicht nur untereinander, sondern auch mit der Umwelt.

Die psychischen Gesetze folgen nicht aus den Eigenschaften einer isoliert betrachteten Zelle und lassen sich nicht auf diese "zurückführen". Friedrich Engels sagte:

"Wir werden sicher das Denken einmal experimentell auf molekulare und chemische Bewegungen im Gehirn 'reduzieren'; ist aber damit das Wesen des Denkens erschöpft?"

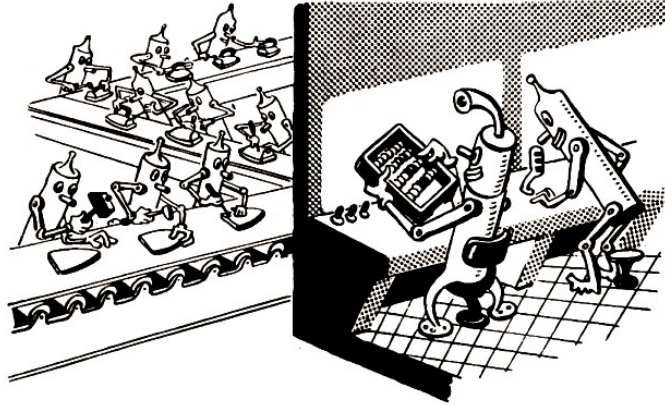
Das Wesen des Denkens, dieses höchsten Prozesses der Verarbeitung von Information, den wir kennen, wird ebenso wie das Wesen von einfacheren Handlungen eines Automaten nicht durch die physikalische Natur der Bauelemente bestimmt, sondern durch die Prinzipien ihrer Organisation in einem einheitlichen System.

---

<sup>47</sup>M. W. Machowko, P. Makarow: Allgemeine Biologie. 1956

<sup>48</sup>T. Lucretius Carus: Von der Natur der Dinge. Deutsch in der Versweise der Urschrift von W. Binder, 2. Buch, Vers 786 bis 790. Stuttgart 1868.

## 12 Informationsverarbeitende Maschinen, sie vergleichen, klassifizieren, analysieren und rechnen, ja sie spielen sogar



Das Schloss, die älteste informationsverarbeitende Maschine - Wie die Linotype ihre Matrizen sortiert - Die Verarbeitung kontinuierlicher und diskreter Signale - Die Geschichte der Dezimalrechenmaschinen - Maschinen rechnen nicht nur, sondern sie analysieren auch - Mechanisierte Logik - Maschinen konstruieren und vervollkommen sich selbst - Die Entstehung einer allgemeinen Theorie der Automaten - Kann man im Spiel gegen eine Maschine gewinnen?

In einer Chronik der alten Stadt Nowgorod fand man unter der Jahreszahl 1528 eine ergreifende Eintragung: Ein einfacher Mann, von dem nicht einmal der Name bekannt war, erdachte in seinem ungekämmten Schädel ein wunderschönes Modell.

Er stellte sich quer durch den mächtigen Fluss Wolchow eine Kette von Holzgerüsten, die mit Steinen gefüllt sind, vor, und der Fluss dreht folgsam ein Mühlrad. Das Mehl fließt in weißen Strömen den guten Menschen in die Säcke. Es gab dort keine Mühle, aber das Modell in seiner Phantasie mahlte schon. Als er eines Tages am Ufer stand, sagte dieser Mann laut zu sich selbst:

"Ach, würde mir doch jemand befehlen, dass ich an diesem Fluss eine Mühle bauen soll ..."

In den Köpfen der Nowgoroder erzeugten diese Worte auch ein Modell, aber ein anderes: Hochwasser, reißendes trübes Wasser bringt Eisschollen, die erwachte Naturkraft drängt gegen die Holzgerüste, sie krachen, geben nach der Damm zerrißt und wird hinweggeschwemmt.

Daher entgegneten sie zweifelnd:

"Unser Wolchow hat in der Jugend kein Mehl gemahlen, ob er es im Alter lernt?"

Dennoch wurde der Damm gebaut - das erste Modell wurde verwirklicht. Nach einem Jahr wurde der Damm fortgeschwemmt - auch das zweite wurde realisiert. Da verprügelten die Nowgoroder den Erbauer und gaben ihm den Namen "Unwissend". Er war ans Werk gegangen, ohne die Folgen seiner Handlungen vorauszusehen. Es zeigte sich, dass die Nowgoroder ihren Wolchow besser kannten als der zugewanderte Mann.

Vierhundert Jahre später bauten sowjetische Ingenieure einen Damm für ein Wasserkraftwerk durch den Wolchow. Der Damm steht heute noch, und er wird stehen, solange er gebraucht wird. Das liegt nicht an der Dauerhaftigkeit des Betons, sondern an den Methoden des Voraussehens. Heute beherrschen die Ingenieure ausgezeichnete Methoden zur Modellbildung, bei denen alle wesentlichen Eigenschaften des modellierten Objekts Berücksichtigung finden.

Zur Modellbildung und Untersuchung der Modelleigenschaften benutzen sie nicht nur die ihnen im gleichen Maße wie "Unwissend" verliehenen natürlichen Fähigkeiten, sondern auch die moderne Technik.

Die Forscher und Techniker verwenden heute verschiedenartige Maschinen, die in der Lage sind, schrittweise gewisse Modelleigenschaften quantitativ und qualitativ zu berechnen und sogar neue Modelle zu entwickeln. Das ermöglicht es, selbst dann zweckmäßig zu handeln, wenn das menschliche Gehirn die Handlungen wegen ihrer Kompliziertheit oder der Geschwindigkeit, mit der eine Entscheidung zwischen mehreren möglichen Handlungen gefällt werden muss, nicht mehr direkt kontrollieren kann.

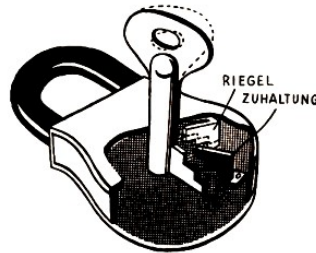


Bild 12.1.: Ein Schloss führt eine logische Operation aus: Es vergleicht das im Schlüssel enthaltene Kodewort mit dem durch die Zuhaltung realisierten Kodewort.

Die älteste informationsverarbeitende Maschine ist das Schloss. Diese Schöpfung der Technik unterscheidet sich wesentlich von den Maschinen, mit denen wir es gewöhnlich zu tun haben. Das sind Maschinen, die nützliche Dinge herstellen oder Energie umwandeln, sie setzen die Tätigkeit der Hände und Füße des Menschen fort, erleichtern sie und verstärken sie. Das Schloss produziert nichts und erleichtert, genau genommen, die Tätigkeit des Menschen in keiner Weise. Im Gegenteil, es behindert ihn häufig.

Die alten Kulturen der Ägypter, der Chinesen und der Griechen kannten das Schloss bereits, die "Ilias" und die "Odyssee" erwähnen es. Bei Ausgrabungen in Pompeji fand man mit prächtigen Schmuck versehene Schlösser und Schlüssel. Das Verlangen nach einem Schloss hatte sich auf Grund der Unvollkommenheit der gesellschaftlichen Verhältnisse entwickelt; es ist zu hoffen, dass die Schlösser mit der Zeit aussterben.

Zu jedem Schloss gehört eine Anzahl von (passenden) Schlüsseln, seine Informationsverarbeitung besteht im Vergleich zweier Kodewörter, nämlich des Kodewortes, das durch den Schlüssel selbst gegeben ist mit dem Kodewort, das von dem Mechanismus des Schlosses repräsentiert wird. Es ist nicht schwer zu erraten, dass kompliziertere Schlüssel mehr Information beinhalten als einfache.

Genaugenommen handelt es sich nicht nur um die Raffiniertheit der Form: Wenn es die Genauigkeit der Bearbeitung, die Haltbarkeit des Materials und die Größe des Bartes ermöglichen, können wir beispielsweise 500000 mechanisch unterscheidbare Schlüsselvarianten herstellen. In diesem Fall enthält jede Variante 19 bit Information. Aber ein Schloss für einen einfachen Schlüssel kann man manchmal auch mit einem anderen, komplizierteren Schlüssel öffnen, während das Umgekehrte nicht möglich ist.

Liegt hierin nicht ein Widerspruch? Wenn wir ein Schloss mit einem Schlüssel öffnen können, der z. B. 3 bit Information enthält, und öffnen es aber mit einem 19 bit enthaltenden Schlüssel - wohin verschwinden dann die 16 bit Information beim Öffnen des Schlosses?

Der springende Punkt ist hierbei natürlich die Tatsache, dass man das "3-bit"-Schloss nicht mit jedem "19-bit"-Schlüssel öffnen kann, sondern nur mit jenen Schlüsseln, die an einer

bestimmten Stelle des Bartes eine bestimmte Form haben (die gerade 3 bit Information trägt). Die übrige Information der Schlüsselvariante ist offenbar redundant und für das "3-bit"-Schloss unwesentlich, wertlos.

In einem Schloss befinden sich Einschnitte und Trennwände, die nicht passenden Schlüsseln und Dietrichen den Zugang zu dem grundlegenden Effektor - dem Riegel - versperren.

Jeder Ausbuchtung eines passenden Schlüssels entspricht ein Einschnitt, jeder Einbuchtung eine Trennwand. Dieser Schlüssel gibt seinem Schloss den Befehl "öffnen", während diese Information in anderen Schlüsseln fehlt. Dass zum Öffnen eines Schlosses eine große Informationsmenge, d. h. ein komplizierter Schlüssel, notwendig ist, ist seine wertvollste Eigenschaft, wenn zu seiner Öffnung eine Informationsmenge genügt, die in einem gebogenen Nagel enthalten ist, dann kann man das Schloss getrost wegwerfen.

In der speziellen Shannonschen Formel, der Hauptformel der Informationstheorie, tritt die Anzahl der Alternativen, d. h. der möglichen Fortsetzungen des Prozesses auf, und in der allgemeinen treten noch deren Wahrscheinlichkeiten hinzu.

Die Anzahl aller möglichen Alternativen in der Fortentwicklung der Welt ist aber unbegrenzt. Die Formel ist nur dann anwendbar, wenn ein Teil der Alternativen schon ausgeschieden ist, wenn schon - im allgemeinen unvollständige - Information vorhanden und die Unbestimmtheit daher beschränkt ist. Je geringer die Unbestimmtheit ist, desto einfacher ist das zweckmäßige Handeln.

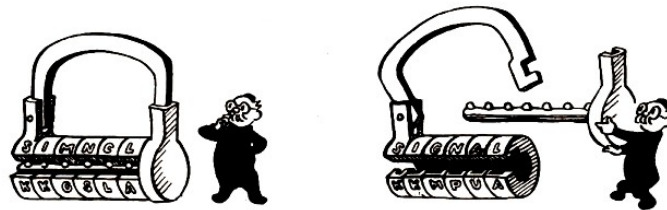


Bild 12.2.: Ein Kombinationsschloss kann ein Kodewort erkennen, nämlich die Buchstabenkombination, die es öffnet.

Das Schloss führt die einfachste logische Operation aus - das Vergleichen bzw. Unterscheiden. Das Schloss unterscheidet seinen Schlüssel von fremden, es erkennt ihn durch einen Vergleich der Information.

Vielleicht erscheint es manchem unangebracht zu sagen, das Schloss vergleiche Information und "erkenne" seinen Schlüssel. Aber es gibt auch Kombinationsschlösser, bei denen man eine bestimmte Kombination von Buchstaben oder Ziffern, ein "Geheimwort", einstellen muss, damit sich das Schloss öffnet.

Ein Wort ist uns als Träger von Information, als Kodewort völlig geläufig. Nach der Phantasie des Kunden kann das Schloss so eingestellt werden, dass es irgendein Wort einer beliebigen Sprache, dessen Länge die Anzahl der Einstellringe nicht übersteigt, erkennt. Nehmen wir an, dass es das Wort "offen" ist: Auf dem ersten Ring muss man „O“ einstellen, auf dem zweiten „f“ usw.

Was soll uns jetzt daran hindern zu sagen, dass das Schloss ein Wort der deutschen Sprache erkennt?

Man erzählt sich folgende Anekdote: Als in einem Automobilwerk die ersten Wagen hergestellt wurden, fuhren diese vom Fließband auf den Hof, während die Schlüssel in einem Beutel gesammelt wurden. Bei Ankunft der ersten Käufer standen auf dem Hof Hunderte von Wagen. Da erinnerte man sich an den Beutel mit den Schlüsseln ... Es kostete viele Mühe herauszufinden, welcher Schlüssel zu welchem Wagen passt.

Diese Operation kann man einer Maschine übertragen. Wir erhalten ein Gerät, das eine kompliziertere logische Operation ausführen kann, eine Klassifikation, die in einer Folge von Entscheidungen besteht. Ein Teil der Linotype-Setzmaschinen führt eine solche Klassifikation durch, und zwar folgendermaßen:

In der Maschine sind auf die Fächer eines Magazins Matrizen verteilt, d. h. kleine Platten mit kleinen Gussformen für jeden einzelnen Buchstaben. Nach Befehlen des Setzers, der eine Tastatur bedient, werden sie zu einer Zeile zusammengestellt, und nachdem die Zeile gegossen ist, kehren sie automatisch wieder in ihre Fächer zurück.

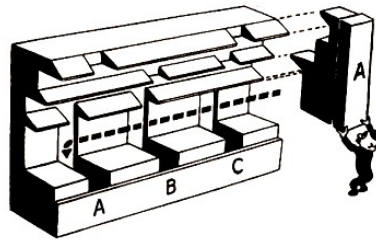


Bild 12.3.: Der Sortiermechanismus der Linotype-Setzmaschine verteilt die Lettern auf ihre Fächer. Die Matrizen werden zu diesem Zweck über eine Gleitbahn geschoben: Wenn jedem Vorsprung der Matrize ein Einschnitt der entsprechenden Schiene und jedem Vorsprung einer Schiene ein Einschnitt der Matrize entspricht, so fällt sie in ihr Fach herunter.

Damit die Maschine die Buchstaben beim Sortieren unterscheiden kann, hat jede Matrize oben sieben Zahnpaare, die in verschiedenen Kombinationen abgesägt sind. Mit anderen Worten: Die Matrizen sind durch Kodewörter aus sieben Binärzeichen markiert, jedem Buchstaben entspricht eine eigene Kombination. Äußerlich sind die Zähne der Linotypematrizen den Bärten von Schlüsseln sehr ähnlich.

Alle Matrizen werden in der Reihenfolge, in der sie in der Zeile standen, durch eine Schnecke längs einer Gleitbahn über die Fächer des Magazins geschoben. Längs der Gleitbahn verlaufen sieben Schienen, die an entsprechenden Stellen Unterbrechungen haben. Die Matrizen gleiten mit ihren Zähnen auf diesen Schienen, natürlich nur mit denen, die nicht abgesägt sind, und passieren nach und nach die Abschnitte der Gleitbahn. Entspricht jedem nicht abgesägten Zahn eine Unterbrechung an der Gleitschiene, so fällt die Matrize in ein Fach, und zwar in ihr Fach zurück.

Die Unbestimmtheit ist bei der Einteilung in mehr als zwei Klassen höher als beim einfachen Erkennen (dem Einteilen in zwei Klassen, z. B. passt - passt nicht), da beim Klassifizieren mehrere Entscheidungen getroffen werden müssen: "nein - nein - ja".

Die Entscheidungen sind dabei im allgemeinen nicht gleichwahrscheinlich. Die Buchstaben eines sinnvollen Textes haben z. B. nicht alle die gleiche relative Häufigkeit.

Der Erfinder der Linotype, Ottmar Mergenthaler, berücksichtigte das und ordnete die Fächer für die am häufigsten gebrauchten Buchstaben am Anfang der Sortieranlage an.

Ein solches Gerät zum Klassifizieren oder Sortieren kann man auch zur Ausführung komplizierterer rein informatorischer Aufgaben verwenden. Jeder weiß zum Beispiel, wie schwer es ist, in einem Katalog mit Tausenden von Karteikarten Angaben über Literatur zu einem speziellen Problem zu finden.

Man kann aber die verschiedensten Probleme und Problemkreise einfach nummerieren. Alle technischen Probleme zum Beispiel werden durch einen in Moskau arbeitenden "Patentklassifikator" in zwanzigtausend Gruppen (89 Klassen) eingeteilt. Ein Kodewort eines Binärkodes

mit fünfzehn Zeichen bestimmt die Auswahl von einer aus 32768 Varianten; folglich genügt einer Sortiermaschine eine Kombination von 15 gelochten oder nicht gelochten Stellen einer Lochkarte, um die Karteikarten aus der Kartothek herauszusortieren, die der Kunde benötigt. Gewöhnlich betrifft eine Erfindung mehrere Gruppen - das kann durch die Kodewörter ausgedrückt werden. Interessiert den Kunden ein Problem, das mehrere Gruppen betrifft, so gibt die Maschine alle diese Gruppen heraus.

Heute existiert bereits das Projekt einer Maschine, die Montageprozesse steuert und dabei die Einzelteile klassifiziert. Zu diesem Zweck messen automatische Lehren die Maße der Einzelteile (beispielsweise von Schrauben und Muttern) und stanzen die Abweichungen vom vorgegebenen Maß in Lochkarten. Auch bei Maßabweichungen gehen die Einzelteile nicht in den Ausschuss - die Maschine wählt nach einem Vergleich der Abweichungen einfach zu einer Mutter mit einer größeren Öffnung eine stärkere Schraube.

Die Rolle des Konstrukteurs der Maschine reduziert sich hier auf die Koordinierung der Informationskodierung und des Vergleichs, d. h. auf die Schaffung der Voraussetzungen für den Informationsfluss. Die Klassifikation und das Heraussortieren zueinander passender Teile nimmt die Maschine selbst vor.

Schon vor langer Zeit war der Mensch bestrebt, technische Hilfsmittel zum Aufspeichern von Information zu schaffen. Zuerst verwendete er die Zeichnung, das manuelle Festhalten gesehener Bilder. Dann entwickelte sich aus der Zeichnung die Schrift, das manuelle Mittel zum Festhalten gesprochener Information. Diese Methoden waren mit einem bestimmten Verlust an Information verbunden: In eine Zeichnung und ein Gemälde lässt sich die Bewegung nicht übertragen und in die Schrift nicht der Tonfall, die Klangfarbe der Stimme.

Zuerst die Fotografie, dann der Film, die Farbfotografie, der Farbfilm und der dreidimensionale Film, die Mittel der Tonaufzeichnung vom Edisonschen Phonographen bis zum modernen Tonbandgerät - alle diese komplizierten technischen Hilfsmittel ermöglichen es, fast die gesamte Information, die der Mensch durch Auge und Ohr erhält, für eine beliebig lange Zeit festzuhalten.

Aber in allen aufgezählten Formen von Informationsspeichern kann die Information keine logischen Beziehungen mit anderer Information eingehen, kann sie nicht umkodiert oder verarbeitet werden. Es liegt ein dauerhaftes, aber passives Gedächtnis vor, das nur dazu geeignet ist, dem Menschen die Möglichkeit zu geben, etwas als real zu empfinden, was schon längst vergangen ist: Worte von Puschkin, den Gesang von Caruso oder das Bild der verstorbenen Eltern.

Diese Eigenschaft des passiven Gedächtnisses kann man auch in allgemeinerer Form ausdrücken: Ein Informationsspeicher macht uns unabhängig vom Wachstum der Entropie. Wir sind in der Lage, dem Speicher Informationen zu entnehmen, die sonst in der Welt nirgendwo mehr existieren. Wenn mehrere Speicher die Informationen desselben Informationspotentials enthalten, so kann man die Informationen vergleichen, Fehler, die bei ihrer Einspeicherung entstanden sind, beseitigen - die Information kontrollieren.

Wir wissen, was die nächste Etappe bei der Entwicklung eines kybernetischen Systems ist, wenn die Entropie unter Kontrolle gebracht worden ist. Das System muss Information sammeln, es muss sein Organisationsniveau heben. Dazu muss das System ein Modell der Erscheinungen und Zusammenhänge in seiner Umwelt bilden und vervollkommen. Insbesondere muss das System also nicht nur das Auftreten gewisser Erscheinungen in seiner Umwelt erkennen und registrieren (speichern), sondern auch Zusammenhänge quantitativ und qualitativ erfassen.

Die Technik des Zählens hat sich von Anfang an verschiedenartiger Einrichtungen bedient,



die die geistige Arbeit des Rechners erleichtern. Bei vielen Völkern der Erde gibt es zum Beispiel Legenden von Feldherrn, die am Tage vor einem großen Feldzug oder einer Schlacht den Kriegern befahlen, je einen Stein oder eine Handvoll Erde herbeizutragen, und die Stärke der Truppen nach der Größe des entstandenen Stein- oder Erdhaufens beurteilten.

Für die lese- und schreibunkundigen Feldherrn jener Zeit war dieses Prinzip der Modellierung von Größen, das einen anschaulichen Vergleich zulässt, eine gute Idee.

Das übliche Verfahren der Modellierung von Zahlen bestand darin, dass man sie mit den Fingern der Hände identifizierte, dem ersten Zählgerät des Menschen. Als die Größe der verwendeten Zahlen die Anzahl der Finger überstieg, lernten viele Völker, andere Körperteile - Arme, Beine usw. - in einer festgelegten Reihenfolge zum Zählen zu verwenden.

Die Insulaner der Torresstraße<sup>49</sup> konnten bis 33 zählen, indem sie von den Fingern zum Handgelenk, zum Ellbogen, zur Schulter usw. übergingen. Zur Modellierung größerer Zahlen benutzten sie Bündel von Stäbchen. Die alten Griechen erfanden zu diesem Zweck eine Tafel mit Steinchen, den "Abakus", die Indianerstämme in Peru Schnüre mit Knoten, "Quippu" genannt, die Slawen Kerben und Schnitte in Holztäfelchen, den "Birkas".

Das alles sind Modelle, in denen Zahlen gespeichert werden können.

Die Abstraktion von einer Menge von konkreten weichen Fuchsfellen zu ihrer abstrakten Anzahl, d. h. einem abstrakten Modell einer einzigen Eigenschaft dieser Menge, nämlich gerade aus so und so vielen Fuchsfellen zu bestehen, ist ein wesentlicher Fortschritt, denn jetzt können solche konkreten Operationen, wie Hinzufügen weiterer Fuchsfelle, Wegnehmen von Fuchsfellen, Vergleich zweier Mengen von Fuchsfellen usw. im Kopf ausgeführt werden, indem man entsprechende Operationen (Addition, Subtraktion, Vergleich) mit den Modellen ausführt.

Übrigens hatten die Birkas auch noch einen anderen Zweck: Sie ermöglichten eine Kontrolle. Zwei Teilnehmer eines Vertrages teilten das Holz quer zu den Kerben, und jeder nahm eine Hälfte mit. Durch einen Vergleich beider Teile konnten sie nachprüfen, ob auf dem Holz neue Kerben aufgetaucht oder alte weggeschabt worden waren.

Waagen und Uhren waren die ersten Geräte, die mechanisch einen Vergleich bzw. eine Summation ausführten. Was ist denn eine Uhr?

Ein Gerät, das von einem vereinbarten Moment an, etwa von Sonnenaufgang an, Signale zählt, die gleichmäßig, in gleichen Zeitabständen erzeugt werden. Auf einer Skale, dem Zifferblatt der Uhr, können wir in jedem Moment in Stunden und Minuten die Anzahl der Zeiteinheiten, die seit dem vereinbarten Anfangsmoment vergangen sind, ablesen.

Eine Balkenwaage ist ein Gerät zum Vergleichen zweier Massen; ist die eine Masse irgendwie durch eine Zahl (die Maßzahl) charakterisiert und es herrscht Gleichgewicht, dann besitzt die zweite Masse die gleiche Maßzahl, vorausgesetzt, die gleiche Einheit wird zugrunde gelegt. Kleingeld zum Beispiel wird auch heute oft nicht mit der Hand abgezählt, sondern (nach Münzsorten getrennt) gewogen.

Eine Uhr sammelt keine Information: Obwohl 7 größer ist als 1, ist in der Nachricht, dass es jetzt ein Uhr nachts ist, unter sonst gleichen Bedingungen ebensoviel Information enthalten wie in der Nachricht, dass es jetzt sieben Uhr morgens ist. Dafür sammelt sie Fehler.

Es ist interessant, zwei Formen von Uhren zu vergleichen: die heute fast verschwundenen Sanduhren und die gewöhnlichen Pendeluhr.

In einer Sanduhr rieselt der Sand gleichmäßig in einem feinen Strahl aus einem oberen Behälter in einen unteren. An der Füllung des unteren Behälters können wir ablesen, wieviel Zeiteinheiten

---

<sup>49</sup>Torresstraße - Meerenge zwischen Australien und Irian (Neuguinea)

seit Inbetriebsetzen verfließen sind. Dazu ist an dem Behälter eine Skale angebracht. Der stetige und gleichmäßig fließende Sandstrahl ist ein Analogon, ein Modell der Zeit, die nach unserer Kenntnis ebenfalls stetig und gleichmäßig vergeht.

Anders ist es bei einer Pendeluhr. Die Räder der Uhr bewegen sich die meiste Zeit nicht, sie drehen sich nur in dem Moment, in dem das Pendel an den Anker anstößt. Wir sehen nur deshalb nicht, wie die Zeiger über das Zifferblatt "springen", weil diese Sprünge sehr klein sind.

Die Zeitinformation der Sanduhr wird erst nach der Summation beim Ablesen der Skale unste-tig, diskret, in Sekunden und Minuten geteilt. Man kann die Sanduhr zwar als Summiergerät, aber nicht als Zähler bezeichnen, da sie keine Zeiteinheiten zählt, sondern die Zeit durch den Vergleich mit der Sandmenge im unteren Behälter misst.

Eine Pendeluhr zählt dagegen Pendelausschläge - das Pendel zerlegt die Zeit in diskrete Einheiten, die gleich der vollen oder der halben Dauer einer Pendelschwingung sind (je nachdem, ob das Pendel den Anker einmal oder zweimal bei einer Schwingung anstößt).

Wenn aber das Zählen, diese einfachste arithmetische Operation, auf zwei verschiedenen We-gen ausgeführt werden kann, so kann man auch alle übrigen Operationen, die sich aus ihr logisch herleiten lassen, verschieden ausführen: durch Operationen mit Zahlen (diskreten Ko-des) und durch Operationen mit physikalischen Größen-Analoga (stetigen Codes).

Das in der Sowjetunion übliche Bürorechenbrett, ein Nachkomme des Abakus, ist ein diskretes Rechenhilfsmittel. Entsprechend dem verwendeten Dezimalsystem besteht es aus Drähten, auf die je zehn Kugeln aufgereiht sind. Die Drähte entsprechen den Stellen.

Der Einfachheit halber wollen wir die unteren Drähte, die für Operationen mit Brüchen be-stimmt sind, nicht berücksichtigen.

Dann dienen die Kugeln auf dem ersten Draht von unten zur Modellierung der Einer, die Ku-geln auf dem zweiten Draht zur Modellierung der Zehner, und es folgen Hunderter, Tausender usw. Jede Kugel am linken Ende eines Drahtes modelliert einen gezählten Einer, Zehner, Hun-derter - mit einem Wort, eine gezählte Einheit der jeweiligen Stelle; die Kugeln am rechten Ende eines Drahtes bilden die Reserve.

Das Verschieben einer Kugel auf einem Draht von der rechten auf die linke Seite bzw. um-gekehrt entspricht dem Addieren bzw. Subtrahieren einer Einheit an der dem Draht entspre-chenden Stelle.

Durch Verschieben der Kugeln von der einen Seite auf die andere nach bestimmten Regeln können wir mit Hilfe der gewöhnlichen Rechenbretter addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und uns auch Zahlen merken (speichern).

Eine nicht geringere Verbreitung hat ein anderes mathematisches Gerät, der Rechenstab, der 1624 von Edmund Günter erfunden wurde. Er dient nur zum Multiplizieren, Dividieren, Po-tenzieren usw. und ist zum Addieren und Subtrahieren nicht geeignet. Im Grunde genommen addiert und subtrahiert man zwar mit ihm, aber nicht die Zahlen selbst, sondern ihre Loga-rithmen.

Die Addition der Logarithmen ist bekanntlich der Multiplikation der Zahlen gleichwertig und die Subtraktion der Division. Um die Benutzung des Rechenstabs zu vereinfachen, sind auf den logarithmischen Teilungen der Skalen nicht die Logarithmen, sondern die Zahlen selbst angegeben. Im Rechenstab kann man auch Zahlen speichern, nämlich mit Hilfe eines durch-sichtigen Läufers mit einem feinen Strich.

Um die Arbeitsweise des Rechenstabs zu verstehen, betrachten wir an seiner Stelle den "arith-

metischen" Rechenstab, der praktisch nutzlos ist, weil er sich nur zur Addition und Subtraktion kleiner Zahlen eignet.

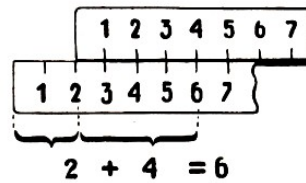


Bild 12.4. Unser arithmetischer Rechenstab addiert Strecken, deren Längen den zugeordneten Zahlen proportional sind. Matrize entspricht, so fällt sie in ihr Fach herunter.

Ein solches Gerät kann man aus zwei gewöhnlichen Linealen mit Zentimetereinteilung herstellen, indem man ihre Skalen so zusammenlegt, dass die Nullen auf einer Seite sind.

Um etwa die Aufgabe  $5 + 7 = ?$  zu lösen, bringen wir die Null des oberen Lineals unter die 5 des unteren und lesen unter der sieben des oberen die Summe, nämlich 12, ab: Sie steht an dem Teilstrich des unteren Lineals, der mit dem Teilstrich der 7 des oberen Lineals zusammenfällt. Wie man leicht sieht, addieren wir Strecken. Ebenso könnte man vom Lineal mit dem Zirkel eine Strecke von 5 cm abnehmen, sie von irgendeinem Punkt einer Geraden aus abtragen, dann vom so erhaltenen Endpunkt 7 cm abtragen und die sich ergebende Gesamtstrecke (die Summe) in den Zirkel nehmen und am Lineal abmessen.

Was passiert aber, wenn nicht 5, sondern 5,01 cm, und nicht 7, sondern 7,03 cm abgetragen werden? Es entsteht nichts Sinnloses, kein Fehler: Die Summe wird, wenn wir sie genau ablesen können, gleich 12,04 cm.

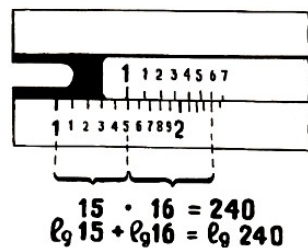


Bild 12.5.: Der logarithmische Rechenstab addiert Strecken, deren Längen den Logarithmen der zugeordneten Zahlen proportional sind. Mit seiner Hilfe kann man die Multiplikation und die Division relativ einfach durchführen.

Darin besteht der grundlegende Unterschied zwischen dem Operieren mit stetigen Größen-Analoga, wie es vom arithmetischen oder gewöhnlichen Rechenstab durchgeführt wird, und dem Operieren mit diskreten Werten, wie wir es beim Rechenbrett finden. Nicht nur ausgewählte diskrete Werte, sondern alle Werte eines gewissen Bereichs treten beim Operieren mit stetigen Größen als Werte und Argumente auf.

Je nachdem, mit welcher Art von Signalen (stetigen oder diskreten) eine informationsverarbeitende Maschine arbeitet, nennt man sie Analogiegerät (die eingegebenen Informationen werden durch stetige Größenanaloga dargestellt) oder Digital- gerät (den Informationen sind diskrete Werte zugeordnet).

Man unterscheidet die informationsverarbeitenden Systeme aber nicht nur nach der Art der Signale, mit denen sie operieren, sondern auch nach der Wirkungsweise. Als analogarbeitend bezeichnet man solche Maschinen, die ein Modell des untersuchten dynamischen Prozesses sind, während man Geräte, die die eingegebenen Informationen taktweise, in einzelnen, zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten verarbeiten, digitalarbeitend nennt.

Die üblichen Rechenautomaten sind digitalarbeitende Digitalgeräte, wie wir sehen werden, die gebräuchlichen Analogrechner dagegen analogarbeitende Analogiegeräte. Es gibt aber auch z. B. digitalarbeitende Analogrechner, nämlich solche, die ein sogenanntes Iterationsverfahren durchführen.<sup>50</sup>

Das bekannteste Problem, das von analogarbeitenden Analogiegeräten gelöst wird, ist die Berechnung des Treffpunktes eines Flakgeschosses mit einem fliegenden Ziel. Die Maschine extrapoliert die Flugbahn des feindlichen Flugzeugs, d. h., sie berechnet aus der gegenwärtigen Flugrichtung und Geschwindigkeit den Ort, an dem sich das Flugzeug auf Grund dieser Daten höchstwahrscheinlich nach Ablauf der Zeit befinden wird, die das Geschoss benötigt, um das Flugzeug zu erreichen, und bestimmt dann die entsprechende Schussrichtung.

Von einem analogarbeitenden System (einem physikalischen Modell) kann man die Voraussage erhalten, die "Unwissend" nicht gelungen war; nämlich wie sich ein Damm bei Hochwasser verhält. Stellt man ein (maßstäbliches) physikalisches Modell des Damms und seiner Umgebung her, so kann man durch Messungen näherungsweise die Kräfte bestimmen, die auf den Damm ausgeübt werden, und die Grenze seiner Haltbarkeit ermitteln.

Eine analog-arbeitende Maschine ist also ein Modell einer Erscheinung, das die zeitliche Veränderung ihrer wesentlichsten Eigenschaften wiedergibt.

Um aber ein adäquates Modell konstruieren zu können, ist Information erforderlich. Der Konstruktion eines physikalischen Modells geht dabei nicht selten der Aufbau eines abstrakten Modells voraus, dies geschieht auf der Basis bekannter abstrakter Modelle, z. B. des Aussagenkalküls oder der Arithmetik, in dem diese Modelle passend eingeschränkt und interpretiert werden.

So beschreibt man viele zeitabhängige Prozesse durch Gleichungen, z. B. Differentialgleichungen. Diese Gleichungen stellen Listen von Anforderungen dar, die das zugrunde gelegte abstrakte Modell zusätzlich so einschränken, dass es in seinen Eigenschaften mit den ausgewählten Eigenschaften des Objekts übereinstimmt, dass es zu einem Modell dieses Objektes (in Bezug auf die ausgewählten Eigenschaften) wird.

Zu diesem Zweck untersuchen wir die Erscheinung zunächst quantitativ und qualitativ unter verschiedenen Bedingungen. Dann ordnen wir unter Benutzung der Isomorphie zwischen numerischen und räumlichen Beziehungen den Versuchsergebnissen eine grafische Darstellung zu. Eine mathematische Analyse ermöglicht es, zu diesen Kurven (bzw. Flächen usw.) Formeln zu konstruieren, die die zu modellierende Beziehung ausdrücken. Dann erst kann die Maschine konstruiert werden.

Die Struktur einer analogarbeitenden Maschine spiegelt die Struktur des zu lösenden Problems wider, da - wie wir aufgezeigt haben - die zu modellierende Erscheinung im allgemeinen zunächst mathematisch beschrieben wird, handelt es sich also im allgemeinen um ein mathematisches Problem, dessen Struktur durch die Reihenfolge und Art der auf die Eingangsgrößen angewendeten mathematischen Operationen gegeben ist.

Man setzt die Maschine daher im allgemeinen aus Bauteilen zusammen, von denen jedes eine bestimmte mathematische Operation ausführt: Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division, Potenzierung, Logarithmierung, Differentiation und Integration.

---

<sup>50</sup>Näheres zu dieser Unterscheidung siehe: H. Winkler: Probleme der Analogieelektronik und der digitalen Rechentechnik. In: "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963, Seite 409.

Diese Bauteile nennt man Funktionalglieder. Bauteile, die kompliziertere Beziehungen zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen realisieren, nennt man Funktionaltransformatoren. Alle diese Beziehungen lassen sich in verschiedenster Weise realisieren: Durch Mechanismen aus Zahnrädern, Hebeln und Gestängen, durch pneumatische, hydraulische oder elektrische Einrichtungen.

Bei mechanischen Bauteilen bereitet allerdings ihre Verknüpfung oftmals Schwierigkeiten, während hydraulische Anlagen nicht selten Abdichtungsprobleme aufwerfen. Dieser praktische Umstand kann uns zwingen, zu einem elektrischen Modell überzugehen.

Dabei spielt die bei einigen Theoretikern beliebte Erwägung, dass zwischen Mechanik und Hydrodynamik einerseits und der Elektrodynamik andererseits eine qualitative Kluft besteht, dass höhere Bewegungsformen nicht auf niedere zurückführbar sind, keine Rolle.

Ein mit zwei Zahnstangen gekoppeltes Zahnrad zum Beispiel ist ein mechanisches Funktionalglied, das die Addition realisiert. Jede der Stangen dreht bei einer Bewegung das Rad um einen bestimmten Winkel, der dem Radius des Rades umgekehrt proportional ist. Bewegen sich die beiden Zahnstangen nach verschiedenen Seiten, so zeigt der Winkel die Summe ihrer Verschiebungen an.

Die Differentiation und die Integration veränderlicher Größen - Operationen der höheren Mathematik, deren strenge Begründung die Kräfte der größten Geister der Menschheit erforderte - werden von einfachen Schaltungen aus einem Kondensator und einem Widerstand tadellos ausgeführt.

Digitalarbeitende Maschinen stehen der Modellbildung in gewissem Sinne näher. Jede komplizierte Beziehung wird in ihnen durch eine Kombination einfacher Operationen modelliert. Eine Verbesserung des Modells, d. h. eine Anpassung seiner Struktur an neue Erkenntnisse, die bei einer analog arbeitenden Maschine einen Umbau ihrer Struktur nötig macht, kann man bei einer digital arbeitenden Maschine durch eine Änderung der Signalfolge, die das Programm darstellt, erreichen.

Welches Prinzip soll man nun bei der Entwicklung einer automatischen informationsverarbeitenden Maschine vorziehen?

Viele meinen, dass alle vier Kombinationen von Arbeitsweise und Signalart das Recht auf Entwicklung und Anwendung in ihrem Gebiet haben. Geräte, die auf irgendeine bestimmte Operation spezialisiert sind, wird man analogarbeitend aufbauen - die digitalarbeitenden Maschinen sind für universelle Verwendung geeigneter.

Je nachdem, ob von der Maschine eine große oder weniger große Genauigkeit gefordert wird, wählt man diskrete oder stetige Signale. Allgemeine Überlegungen über die Gesetze der Informationsübertragung und die Eigenschaften der Codes besagen nämlich, dass man die besten Ergebnisse von diskret rechnenden Maschinen zu erwarten hat. Die Genauigkeit der mit stetigen Signalen operierenden Maschinen ist nämlich nur eine scheinbare.

Je komplizierter die Maschine ist, desto mehr Funktionalglieder und Teile erhält sie, in denen Fehler, zufällige Abweichungen von dem wirklichen Ergebnis, auftreten und das Ergebnis verzerren. Beim Verarbeiten diskreter Signale verschwinden dagegen Störungen von selbst, wenn sie nicht die Hälfte des Quantelungsschrittes erreichen, um die sich die Signalwerte mindestens unterscheiden.

Nur eine Störung, die einen halben Quantelungsschritt übersteigt, verfälscht einen Signalwert in einen anderen und erzeugt einen Fehler; das kann man jedoch leicht vermeiden.

Wir stellen uns nun die Aufgabe, ein digitales Addiergerät zu konstruieren und Wege zur Automatisierung seiner Arbeit zu finden.

Diese Aufgaben sind beide gar nicht mehr schwer zu lösen. Wir kennen die verschiedensten Arten von Rechengernäten, und die Aufgabe besteht nur darin, das zweckmäßigste Gerät auszusuchen.

In der Technik gibt es eine Vielzahl verschiedener Geräte: Hebel bewegen sich, Zahnräder und reibende Räder drehen sich, verschiedene elektrische Schaltungen halten an den Polen bestimmte Potentiale aufrecht usw. Die Wirkung aller dieser Geräte kann man zahlenmäßig beschreiben. Es seien etwa zwei kämmende Zahnräder gegeben: das eine mit zehn Zähnen, das andere mit zwanzig Zähnen.

Macht das zweite eine Umdrehung, so macht das erste zwei, macht das erste sechs, so macht das zweite nur drei. Das ist also ein Rechengernät, das die Multiplikation mit 2 oder die Division durch 2 ausführt. Auf diese Weise kann man Maschinen zum Multiplizieren aufbauen.

Durch Wiederholung der Addition bzw. Subtraktion kann man die Multiplikation bzw. Division ausführen, durch Wiederholung der Multiplikation bzw. der Division das Potenzieren bzw. Radizieren. Die komplizierteren Operationen der höheren Mathematik lassen sich auf diese arithmetischen Operationen zurückführen.

Auch der Übergang von kleinen Zahlen, etwa denen unter zehn, zu beliebig großen bereitet keine große Schwierigkeit. Die Operationen mit Hunderten und Millionen werden auf Operationen mit Einheiten von Hunderten und Millionen zurückgeführt; für jede Stelle der Zahlen sind die Operationen genau vom gleichen Typ. Folglich können auch die Zählleinrichtungen, die Adder, für alle Stellen gleich sein.

Die Automatisierung von Rechenprozessen schließlich unterscheidet sich in nichts von der Automatisierung eines beliebigen anderen Arbeitsprozesses; man hat ein Programm aufzustellen und die Befehle durch eine geeignete Programmeinrichtung der Maschine zu erteilen.

Im Jahre 1642 baute ein Jüngling, der Sohn eines Steuereinnehmers in der Normandie, der spätere große Physiker Blaise Pascal (1623-1662), für seinen Vater die erste Rechenmaschine - eine Maschine zur Addition und Subtraktion von Zahlen. Seit dieser Zeit und auch heute noch baut man universelle Rechenmaschinen aus dekadischen Stellenaddern, deren Arbeitsprinzip das eines gewöhnlichen Zahnradpaars, d. h. zweier ineinandergreifender Zahnräder, ist.

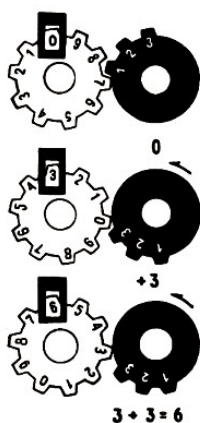


Bild 12.6. Mittels zweier Zahnräder zu 10 und 3 Zähnen, kann man die Addition von 3 und die Multiplikation mit 3 durchführen. Es seien etwa zwei Räder mit je zehn Zähnen gegeben. Drehen wir das erste mit einer Umdrehung um zehn Zähne, so dreht sich auch das zweite um zehn Zähne.

Wir brechen bei dem ersten Zahnrad alle Zähne bis auf einen ab. Drehen wir es nun einmal herum, so dreht sich das zweite Rad um einen Zahn, um eine zehntel Umdrehung.

Lassen wir an dem ersten Rad drei Zähne, so dreht sich das zweite um drei Zähne. Drehen wir das erste Rad dabei zweimal, so dreht sich das zweite um sechs Zähne.

Wenn wir nun, bevor wir die zweite Umdrehung des Rades durchführen, noch einen Zahn abbrechen und zwei übrig lassen, so dreht sich das zweite Rad insgesamt um fünf Zähne. Das zweite Rad addiert also die Anzahl der Zähne auf dem ersten.

Es ist nun eine Aufgabe der Mechanik, das erste Rad so zu konstruieren, dass man seine Zähnezahl variieren kann, ohne die barbarische Methode des Abbrechens zu verwenden. Dann muss man diese Paare, die Adder, so koppeln, dass ihr Zusammenwirken den Regeln der

Arithmetik genügt.

Leibniz, der sich für das Problem des maschinellen Rechnens lebhaft interessierte, baute 1694 eine Multiplikationsmaschine. Ihr Hauptteil war ein Zahnrad, genauer ein Zahnzylinder, der durch axiales Verschieben ein Abgreifen verschiedener Zähnezahlen ermöglichte.

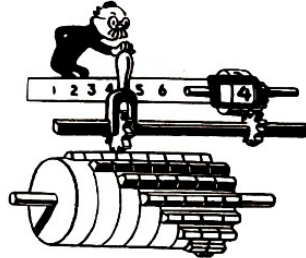


Bild 12.7.: Die Walze der Leibnizschen Maschine ist praktisch ein Satz von Zahnrädern mit verschiedener Zähnezahl - von 1 bis 9. Durch Verschieben eines Zahnrads kann man die Zahl, die addiert oder mit der multipliziert werden soll, auswählen.

Leibniz verlängerte alle Zähne des ersten, des Zahlenrades, längs der Drehachse verschieden weit und erhielt so eine Staffelwalze. Das zweite, das Zählrad, setzte er verschiebbar auf eine quadratische Achse. Schob man das Zählrad bis zum hinteren bzw. vorderen Ende, so erhielt man einen Abgriff mit einem Zahn bzw. mit zehn Zähnen; in den Zwischenstellungen ergaben sich alle anderen Abgriffe.

Die Maschinen von Pascal und Leibniz existierten nur als Versuchsmuster. Die serienmäßige Fertigung von Rechenmaschinen und ihren Verkauf begann 1820 der Mechaniker Thomas de Kalmar.

Wesentlich später, und zwar im Jahre 1874, konstruierte der Petersburger Mechaniker Wilgodt Odner, der in der staatlichen Druckerei arbeitete, in der das Papiergeld gedruckt wurde und wo daher viel gerechnet werden musste, ein Zahlenrad mit herausziehbaren Zähnen, das zwar komplizierter ist als die Staffelwalze, aber weniger Raum einnimmt.

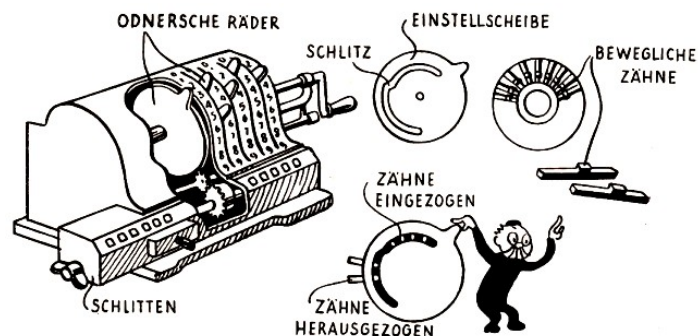


Bild 12.8.: Dieses Rad mit beweglichen Zähnen (rechts) entwickelte Odner; es bildet die Grundlage der allgemein bekannten Handrechenmaschine (links).

Da sich zu dieser Zeit die Technik der Metallbearbeitung vervollkommen hatte, bestand keine Veranlassung um der Einfachheit der Herstellung willen die Maschine zu vergrößern. Die Odnerschen Räder werden in den Addern moderner Rechenmaschinen häufig verwendet. Der Plan der Rechenmaschine wird damit klar. Man muss alle Zahlenräder unbeweglich auf einer Achse befestigen und daneben eine zweite Achse anbringen, auf der sich die Zählräder frei drehen. Dann kann man durch eine Änderung der Zähnezahl eines jeden Zahlenrads eine beliebige mehrstellige Zahl einstellen und durch eine Drehung der Achse diese Zahl in den Adder (die Reihe der Zählräder) überführen.

Dann wird eine zweite Zahl eingestellt und wieder gedreht. Die Stellung der Zählräder zeigt die Summe der beiden Zahlen an. Die Multiplikation lässt sich auf die Addition des Multiplikanden zu sich selbst zurückführen. Daher braucht man zur Multiplikation die Achse nur so oft zu drehen, wie der Multiplikator angibt.

Eine geringfügige Komplizierung entsteht nur dann, wenn man in einem Zählrad von der 9 zur 0 übergeben muss, da dann in der nächsthöheren Stelle automatisch die zu übertragende 1 erscheinen muss. Dazu genügt ein herausragender Zahn, denn wir wissen bereits, dass ein Rad mit einem Zahn bei jeder Umdrehung ein mit ihm gekoppeltes anderes Rad um einen Zahn dreht. Diese Einrichtung bezeichnet man als "Mechanismus der Stellenübertragung".

Auf Grund der Multiplikationsregeln ist es ferner vorteilhaft, alle Zählräder auf der Achse so anzubringen, dass sie sich - zu einem Schlitten vereinigt - längs der Achse der Zahlenräder verschieben lassen, und einen Umdrehungszähler zu bauen.

Das sind alle prinzipiell wichtigen Teile einer Rechenmaschine - einer Maschine, auf der man Zahlen arithmetisch in jeder Weise verarbeiten kann. Die weiteren Vervollkommnungen waren durch das Bedürfnis nach Erhöhung der Geschwindigkeit und der Genauigkeit der Rechnungen bedingt.

Eine derartige Maschine ist noch nicht so kompliziert, dass sie selbst Fehler machen kann. Aber ihre Steuerung ist kompliziert, und der Mensch macht von Zeit zu Zeit Fehler.

Wie wir gesehen haben, erfolgt die Eingabe der Information in die Maschine durch eine Verschiebung des Zählrades längs des Zahlenrades, wenn der Stellenadder nach dem Prinzip von Leibniz gebaut ist, und durch eine Drehung der Einstellscheibe, wenn man Odnersche Räder verwendet. Zu diesem Zweck sind an den Maschinen Einstellgriffe und Skalen angebracht. Die Stellung eines Einstellgriffs lässt sich aber stetig ändern, ist instabil und unbestimmt. Es passiert häufig, dass der Einstellgriff nicht bis zu dem gewünschten Punkt oder über ihn hinaus bewegt wird; er stellt also eine ständige Fehlerquelle dar.

Ein weit besserer Rezeptor von diskreten Signalen ist eine Tastatur, eine Reihe von Knöpfen über einer gemeinsamen Grundfläche. Und überall, wo Schnelligkeit und Genauigkeit gefordert werden, verdrängen die Maschinen mit Tasten die Maschinen mit Skalen und Einstellknöpfen.

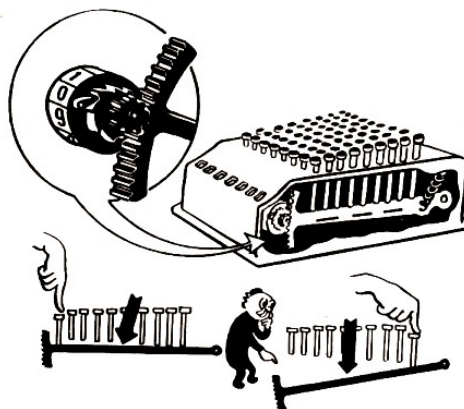


Bild 12.9.: Tastenrechenmaschine mit Hebel. Wird die Taste „1“ gedrückt (unten links), so bewegt sich der Hebel wenig, wird aber „9“ gedrückt (unten rechts), so bewegt er sich mehr, da die Stelle, an der die „9“ gedrückt wird, dem Drehpunkt des Hebels näher ist.

Eine interessante Maschine mit Eingabetastatur, die ein neues Summationsprinzip benutzt, ist die Stellhebelmaschine, die 1905 zum ersten Mal gebaut wurde. Sie hat für jede Stelle einen



Hebel, der ein Sperrrad am Zählrad um irgendeine Anzahl von Zähnen weiterdreht, ohne dass sich das Zählrad bewegt. Erst bei der Rückwärtsbewegung des Hebels schnappt der Sperrhaken ein und bewirkt eine Drehung des Zählrads.

Alle Tasten der gegebenen Stelle setzen auf den Hebel auf; die Taste „9“ liegt der Drehachse am nächsten, es folgen die anderen bis zur Taste „1“, die dem Sperrhaken am nächsten ist.

Der Weg, den ein Punkt des Hebels bei dessen Drehung zurücklegt, hängt bekanntlich von dem Hebelarm - dem Abstand des Punktes von der Drehachse - ab. Darauf beruht die Wirkung der Tastatur: Obwohl alle Tasten, wenn sie gedrückt werden, den gleichen Weg zurücklegen, drehen sie über den Hebel das Zählrad um verschieden viele Zähne und übertragen so gerade die gewünschte Zahl in den Adder.

Die Drehung der Einstellgriffe der Rechenmaschine bzw. die Drehung der Zählräder durch den Hebel sind noch keine reinen Signaloperationen, sie erfordern einen großen Kraftaufwand, der den Menschen ermüdet. Durch die moderne Technik wird fast alle Handarbeit des Rechners ausgeschaltet, indem die Rechenmaschinen mit einem elektrischen Antrieb versehen ist.

In dieser Weise wurden insbesondere die allen bekannten Registrierkassen vervollkommenet, die im Grunde genommen auch Addiergeräte sind. Früher drehte die Kassiererin vor jeder Zahlung die Kurbel der Kasse, heute drückt sie nur auf eine Taste, und mit der von einem Elektromotor gelieferten mechanischen Energie wird der Quittungszettel gedruckt, die Summe auf einem Kontrollstreifen notiert und diese auf den Zähler der Registrierkasse übertragen.

Das Drucken jeder eingegebenen Zahl und jedes Zwischenergebnisses ist nicht nur für die Kontrolle von Handels- und Finanzoperationen vorteilhaft. Alle Rechnungen haben Zwischenergebnisse, die man beim Aufschreiben mit der Hand leicht durcheinander bringen kann, und daher sind auch die universellen Rechenmaschinen mit Druckeinrichtungen versehen. Die Möglichkeit, dass ein Fehler auftritt, ist beim Lesen des Gedruckten jedoch vorläufig noch nicht ausgeschaltet.

Man kann aber dieser Gefahr aus dem Wege gehen, indem man das Drucken durch das Lochen von Streifen oder Karten ersetzt. Eine Information, die in Form von geeignet angeordneten Lochungen verschlüsselt ist, kann die Maschine selbst ohne Hilfe des Menschen genauer und schneller als der Mensch aufnehmen.

Zum Abtasten der Lochungen genügen ganz einfache Wandler, z. B. elektrische Kontakte. Die Kodierung durch Löcher eröffnet neue Möglichkeiten für die maschinelle Verarbeitung von Information, denn man kann beispielsweise durch Änderung der Reihenfolge der Karten oder durch eine Auswahl von Karten Informationen nach verschiedenen Gesichtspunkten vergleichen.

Im Jahre 1880 verwendete der Ingenieur H. Hollerith bei der Verarbeitung von Materialien einer Volkszählung in den USA zum ersten Mal Jacquard-Karten mit Lochungen und entwickelte entsprechende Zähl- und Sortiermaschinen.

Für jeden Menschen, der von der Zählung erfasst wurde, stellte man ein primäres statistisches Dokument - einen Fragebogen - zusammen und übertrug dann die Angaben von diesem durch Lochungen auf eine Karteikarte. Das Alter, das Geschlecht, die soziale Stellung, der Familienstand, der Beruf, das Einkommen, die Nationalität und andere Gruppenmerkmale des Menschen wurden durch unscheinbare Löcher in Karton verschlüsselt.

Die Lochung der Karten erfolgt durch Spezielle Maschinen, die Locher, die durch Tasten gesteuert werden. Die Lochungen verteilen sich entsprechend einer im voraus ausgearbeiteten Vorlage der Karte. Ein Beispiel wird hier gezeigt.

Alter		Geschlecht	Einkommen		Wohnort		
6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	•	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2
•	3	3	•	3	3	3	3
4	4	4	4	•	4	4	4
5	•	5	5	5	5	5	•
6	6	6	6	6	•	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	•	8
9	9	9	9	9	9	9	9
0	0	0	0	0	0	0	0

Die oberen Nummern sind die Spaltennummern. Insgesamt hat eine Karte heute 45 oder 80 Spalten. In unserem Beispiel ist folgender Code gelocht: "Alter - 35; Geschlecht - 1; Einkommen - 34; Wohnort - 685".

Es muss spezielle Entschlüsselungstabellen geben, denn wenn auch "Alter - 35" noch verständlich ist, was bedeutet "Wohnort - 685"?

Es ist eine Liste aller Wohnorte erforderlich, in der jedem Ort eine Nummer zugeordnet wird, wie beispielsweise im System der Postleitzahlen.

Die Benennung der Spalten schreibt man natürlich nicht auf die Karten, da die Maschine sie sowieso nicht liest.

Die gelochte Karte gelangt in eine zweite Maschine, ein Kontrollgerät, in dem sie nach dem ursprünglichen Dokument gewissermaßen ein zweites Mal gelocht wird. In Wirklichkeit wird sie nicht neu gelocht, sondern es wird durch Fühler nur nachgeprüft, ob die richtigen Stellen gelocht sind, und ist das nicht der Fall, so wird im Alarmsignal "Fehler!" gegeben. Auf diese Weise schützt man sich gegen Fehler beim Eintragen der Informationen in die Lochkarte.

Weiter werden die Karten automatisch zu Stapeln gepackt. Betrachtet man einen Stapel, so sieht man sofort, dass bei jeder Karte eine Ecke abgeschnitten ist, und zwar die linke obere. Wozu?

Dieser Schnitt ist ein scharfsinniges Verfahren, das es ermöglicht, mit einem flüchtigen Blick auf den ganzen Stoß Karten sofort festzustellen, ob eine von ihnen verkehrt liegt. Liegt nämlich eine Karte im Haufen nicht ordnungsgemäß, so ragt unbedingt eine nicht abgeschnittene Ecke aus dem gemeinsamen Schnitt des Stoßes heraus.

Die Karten bleiben so lange gestapelt, wie man keine Information von ihnen benötigt. Nehmen wir an, es soll ein Rentenvorschlag für die Menschen gemacht werden, die ein Alter von 50 Jahren erreicht haben. Die Karten kommen in eine Sortiermaschine, die so eingestellt ist, dass sie in ihre 12 Fächer nur die Karten schickt, die in den Spalten 6 und 7 die Codes „50“, „51“ und höher haben.

Die Maschine kann alle Karten, die durch sie hindurchgehen, zählen. Sie stößt gleichzeitig Karten aus, die danach in dem kompliziertesten Teil der Zähl- und Analysieranlage, der Tabelliermaschine, weiter verarbeitet werden.

Durch die Tabelliermaschine gehen der Reihe nach alle ausgewählten Karten. Sie tastet die Karten ab und schickt die Angaben in ihre Zähler, die die Endergebnisse liefern und in Tabellen drucken. Wie die Summation der Zahlen, die den verschiedenen Spalten der Karten entnommen werden, erfolgen soll, schreibt der Mensch der Tabelliermaschine vor, indem er vorher die Zähler entsprechend schaltet.

Die Endergebnisse der Rechnung können auch automatisch in eine Karte eingetragen werden; diesem Zweck dient eine besondere, mit der Tabelliermaschine verbundene Maschine, der Ergebnislocher.

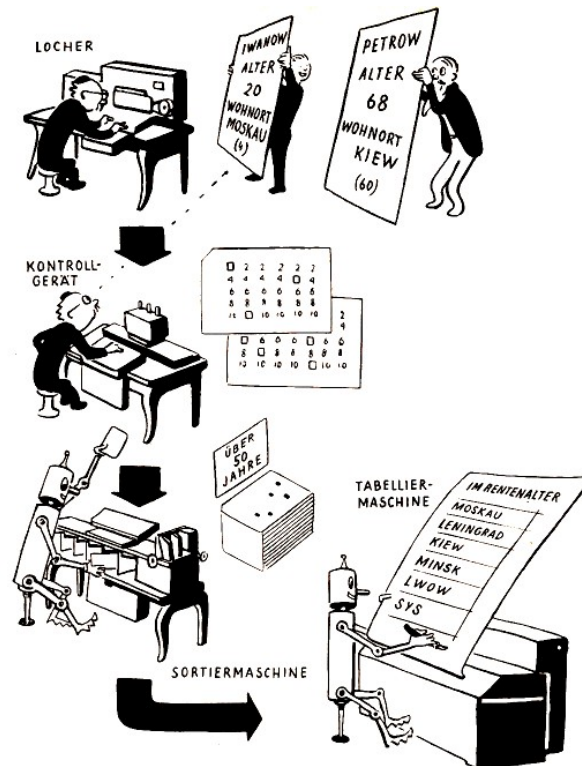


Bild 12.10.: Eine Zähl- und Analysieranlage besteht (von oben nach unten) aus einem Locher, einem Kontrollgerät, einer Sortier- und einer Tabelliermaschine. Die Ziffern des Ausgangsmaterials werden im Locher durch Lochkombinationen in Lochkarten kodiert. Die Lochung wird im Kontrollgerät überprüft. Die Sortiermaschine sortiert die Kartenstöße nach gegebenen Gesichtspunkten in Gruppen, und die Tabelliermaschine stellt aus den in die Karten gelochten Informationen Tabellen zusammen, berechnet Durchschnitte usw., berechnet aus den Daten der Karten weitere Ergebnisse (z. B. die Rentenhöhe) und locht sie in die Karten.

Die Anwendung von Sortier- und Tabelliermaschinen beschränkt sich natürlich nicht nur auf die Bearbeitung von Materialien bei Volkszählungen. Eine Zähl- und Analysieranlage hilft, die Lagerhaltung zu überwachen, die Produktivität der Arbeiter und den ihnen zustehenden Lohn auszurechnen, den Stand von Bankkonten zu überprüfen und die Umsätze von Handelsunternehmen zu berechnen; sie kann eine große Hilfe bei der Planung darstellen, wenn zwischen verschiedenen Varianten eines Plans entschieden werden soll.

Bei einer entsprechenden Schaltung liefert die Tabelliermaschine für jede Variante genaue und vollständige Angaben über die Folgen, die bei der Durchführung dieses Plans zu erwarten sind.

Je mehr sich Industrie und Technik entwickeln, je verschiedenartiger und komplizierter sich die Zusammenhänge zwischen den Produktionszweigen, einzelnen Unternehmen und Institutionen gestalten, desto wichtiger werden Planung und Kontrolle.

Das führt dazu, dass immer mehr gerechnet werden muss. Es entsteht ein ganzer "Produktionszweig", der sich nur mit Rechnen befasst und dessen "Produkt" Ziffernkombinationen auf Papier sind.

Eine seltsame "Produktion", nicht wahr?

Aber Fabriken, Werke, landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaften und Staatsorgane kön-

nen ohne diese Produktion nicht auskommen. Wenn dieser Zweig den Plan nicht erfüllt, so bleiben Züge stehen und Werkbänke werden nicht mehr benutzt, es können keine Flugzeuge abfliegen, und der Kunde, der in den Laden kommt, findet in den Regalen nicht die Waren, die er braucht. In diesem Zweig sind viele Arbeiter beschäftigt, er bedarf ebenso wie andere der Mechanisierung und Automatisierung.

Die Produktion dieses Zweiges besteht u. a. darin, zukünftige Ereignisse vorauszusagen. In den Ziffern der zahlreichen Tabellen, in den grafischen Darstellungen und in Formeln spiegeln sich verschiedene Seiten des gesellschaftlichen Lebens wider, die weder heute auf einen Schlag entstanden sind noch morgen schlagartig verschwinden werden.

Diese Modelle sagen voraus, wo ein Zug in einer bzw. in 24 Stunden sein wird, wieviel Leute morgen Milch und Zucker kaufen, welche Werke Rohstoff, Energie bzw. Arbeitskräfte benötigen. Die Organisation der Gesellschaft, die mit dem Zusammenwirken der Teile eines Organismus zu vergleichen ist, wird durch diese Modelle in steigender Güte widerspiegelt.

Betrachtet man die Konstruktion der Handrechenmaschinen aufmerksam, so kann man feststellen, dass sich auf ihren Aufbau zwei Besonderheiten der gewählten Zahlendarstellung auswirken: Das Prinzip der Stellenübertragung, das allen möglichen Zahlensystemen eigen ist, bei denen es nicht nur auf den Ziffernwert, sondern auch auf die Position der Ziffer relativ zu den anderen ankommt, und die bekanntlich ziemlich zufällige Wahl der 10 als Grundzahl des Systems.

Wären Rechenbretter, Rechenmaschinen oder Zähl- und Analysiermaschinen für die Grundzahlen 12 oder 7 erforderlich, so könnten wir die Konstruktion der Maschinen in den Grundzügen beibehalten und brauchten nur einzelne Teile zu ändern.

Um das besser zu verstehen, müssen wir näher auf die Kodierung von Zahlen eingehen. Viele sind erstaunt, wenn sie hören, dass unser Dezimalsystem zufällig und in mancher Hinsicht sogar schlechter als andere mögliche Zahlensysteme ist, z. B. als das Dualsystem, das anstelle der zehn Ziffern 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 nur zwei benötigt: 0 und 1.

In der Tat erhalten die Informationen bei einer Binärkodierung eine für Transformationen und Speicherungen äußerst geeignete Form, die relativ stabil gegen Störungen ist. Daher ist es von Nutzen, die Möglichkeit der Darstellung von Zahlen im Binärkode zu untersuchen.

Beobachten sie bitte, wie eine Kassiererin im Kaufhaus arbeitet: sie übersetzt durch das Drücken von Knöpfen die dezimalen Ziffern der Rechnungsbeträge in einen eigentümlichen "dual-dezimalen" Ausdruck, da die Ziffern durch den Zustand der Tasten "gedrückt - nicht gedrückt" verkörpert werden.

In der vollen Tastatur, die jeder Stelle zehn Tasten (in einem zweidimensionalen Kode) zuordnet, sieht die Zahl 19510 wie in der Tabelle auf der nächsten Seite aus.

In eindimensionaler Darstellung erhält sie die Form 00001 01000 00000 00000 00000 00100 00000 00000 00000 10010.

Ein Blick auf die Tasten oder auf diese Darstellung zeigt, dass wir es mit einer großen Redundanz zu tun haben, deren Einführung unnötig erscheinen kann. Die Kombinationen der Nullen und Einsen stellen eine Nachricht über die Wahl einer Ziffer für jede Stelle dar. Die gewählte Ziffer kennzeichnen wir durch eine Eins, die anderen, nichtgewählten, durch Nullen.

Die Redundanz dieses Kodes rührt von der Fülle der verbotenen Kombinationen her, die nach den Regeln der Kodierung keinen Sinn haben. Drückt man in einer senkrechten Tastenreihe zwei Tasten gleichzeitig, so entsteht eine Unbestimmtheit in Bezug auf die Frage, welche De-

zimalziffer an dieser Stelle steht. Für jede Stelle darf nur eine Taste gedrückt werden, auch dann, wenn es die Taste Null ist, sonst entsteht eine Unbestimmtheit.

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

Zur Darstellung einer fünfstelligen Zahl ist bei der gewählten Kodierung ein Kodewort aus 50 Binärzeichen erforderlich. Es gibt  $2^{50}$  derartige Kodewörter, von denen nur 100000 sinnvoll sind, die anderen sind verboten.

Wie kann man den Informationsgehalt unseres "dual-dezimalen" Kodes erhöhen?

Eine Dezimalziffer enthält etwa 3,3 bit Information, folglich kann man jede solche Ziffer durch ein Kodewort aus 4 Binärzeichen kodieren. Ändern wir die Kodierungsvorschrift, so werden für eine fünfstellige Zahl nicht wie oben 50, sondern nur 20 Nullen und Einsen benötigt. Auf die 100000 sinnvollen Varianten kommen  $2^{20}$  Kodewörter dieses Binärkodes, d. h. immer noch wesentlich mehr als 1 Million.

Warum tritt jetzt noch eine Redundanz auf? Weil jede Dezimalstelle durch ein Kodewort dargestellt wird, das 4 bit Information tragen kann, aber nur 3,3 bit enthält. Von 16 möglichen Kodewörtern werden nur 10 benutzt. Aber da man nicht 3,3 Zeichen nehmen kann, scheint es unmöglich, diese Redundanz zu beseitigen. Das ganze liegt an der Zehn! Woher kommt sie?

Von alters her haben die Menschen die zehn Finger der Hände beim Zählen zu Hilfe genommen. Das führte dazu, dass das Zählen bei der Zahl 10 aufgehalten wurde: Es wurde nötig, die Zehen oder die Finger eines anderen zu Hilfe zu nehmen. Dann entdeckte man die Möglichkeit, mit größeren Zahlen zu rechnen, man lernte das Zählen von Gruppen gleicher Größe ebenso durchzuführen wie das von Einem. Diese Entdeckung ermöglichte die Einführung von Positionssystemen zur Zahlendarstellung, d. h. Systemen, bei denen die Bedeutung einer Ziffer von ihrer Stellung im Kodewort abhängt.

Eine gewisse Zahl von Einern bildete die Einheit der zweiten Stelle, und dieselbe Zahl von Einheiten der zweiten Stelle bildete die Einheit der dritten Stelle usw. Wählt man die 10 für diese Zahl, so ergibt sich das Dezimalsystem; statt 1111 11111 11111 11111 11111 schreiben wir 24, d. h. zwei Gruppen zu je 10 und vier Einer.

Verschiedene Völker wählten diese Zahl (die Grundzahl des Zahlensystems) verschieden, und oft benutzten sie nicht nur eine, sondern mehrere. Die am häufigsten verwendeten Grundzahlen sind 5, 10, 12, 20, 60.

Von dem babylonischen Zählverfahren haben wir die Aufteilung der Zeiteinheiten übernommen: Die Stunde hat 60 Minuten, die Minute 60 Sekunden. Als Überbleibsel des Zahlensystems mit 12 als Grundzahl taucht noch manchmal das Rechnen mit 12 - mit Dutzenden - auf. Aber die Zehn verdrängte und verdrängt alle anderen Grundzahlen, und das Dezimalsystem wurde zu

dem Zahlensystem der Menschheit.<sup>51</sup>

Man muss aber nicht unbedingt mit Hilfe der Finger zählen, und es liegt nur wenig Sinn in der Wahl der Grundzahl 10. Unbequem ist schon, dass 10 nur durch 2 und 5, während z. B. 12 durch 2, 3, 4 und 6 teilbar ist.

Bei einer größeren Grundzahl sind die Kodewörter zur Darstellung der Zahlen kurz, man muss sich aber mehr Zeichen (Ziffern) und ein umfangreicheres "1 × 1" merken. Bei einer kleineren Grundzahl sind weniger Ziffern zu merken, aber dafür ist die Länge der Kodewörter schon bei der Darstellung kleiner Zahlen relativ groß.

Man vermutet, dass viele Völker in den Anfangsstadien ihrer Entwicklung das Dualsystem benutzt haben. Insbesondere kannten es die Chinesen, die Ägypter und die Slawen. In der altrussischen Sprache gab es neben der Einzahl und der Mehrzahl noch eine besondere Doppelzahl.

Bei den Stämmen der westlichen Inseln der Torresstraße stellten Reisende noch zu unserer Zeit die Existenz von nur zwei Zahlwörtern fest: "urapun" - eins und "okosa" - zwei. Drei hieß in ihrer Sprache: "okosa - urapun", d. h. zwei - eins; vier "okosa - okosa", fünf - "okosa - okosa - urapun" usw.

Ein Vergleich mit dem gewöhnlichen Dezimalsystem erleichtert uns die Erklärung des Prinzips, nach dem die Zahlen im Dualsystem geschrieben und gelesen werden.

Was bedeutet das Kodewort 19862 im Dezimalsystem? Dieses Kodewort beschreibt jene Zahl, die sich aus zwei Einem, sechs Gruppen zu je 10 Einem (also sechs Zehnern), acht Gruppen zu je 10 Zehnern (acht Hunderten), neun Gruppen zu je 10 Hunderten (neun Tausendern) und einer Gruppe zu je 10 Tausendern (einem Zehntausender) zusammensetzt, d. h.:

$$19862 = 1 \cdot 10000 + 9 \cdot 1000 + 8 \cdot 100 + 6 \cdot 10 + 2 \cdot 1$$

Beim Lesen einer Dezimalzahl multipliziert man also jeweils den Stellenwert (Einer, Zehner, ...) mit der an dieser Stelle stehenden Ziffer und summiert. Die Stellenwerte sind gerade die Potenzen von 10; nur deshalb haben gerade die ersten Potenzen von 10 besondere Bezeichnungen in der Umgangssprache, während für Potenzen anderer Zahlen solche Bezeichnungen fehlen.

Beim Kodieren einer Zahl durch ein Kodewort des Dezimalsystems gehen wir die Folge der Potenzen von 10 durch bis zur höchsten, die nicht größer als die Zahl ist. Dann teilen wir die gegebene Zahl durch diese Potenz und schreiben das Ergebnis der Division auf. Nun dividieren wir den Rest durch die nächstkleinere Potenz, schreiben das Ergebnis dahinter und fahren so fort, bis wir den letzten Rest durch  $10^0 = 1$  geteilt und das Ergebnis rechts an die erhaltene Ziffernfolge angefügt haben.

Wir betrachten das aus 15 Binärzeichen bestehende Kodewort

100110000110110

Welche Zahl stellt dieses Wort im Dualsystem dar?

Zunächst schreiben wir uns Potenzen der Zahl zwei nach fallender Größe auf:

...32768, 16384, 8192, 4096, 2048, 1024, 512, 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1

---

<sup>51</sup>Auch in Großbritannien, dessen Währungseinheit, das Pfund Sterling, in 20 Shilling zu je 12 Pence aufgeteilt ist, will man zu einem "dezimalen" Währungssystem übergehen.



Diese Zweierpotenz schreiben wir dezimal und dividieren die gegebene Dezimalzahl durch sie (mit Rest), gleichzeitig notieren wir eine 1. Den Rest dividieren wir (mit Rest) durch die nächstkleinere Zweierpotenz und fügen das Ergebnis rechts an die 1 an. So fahren wir fort, bis wir durch  $2^0$  dividiert und das Ergebnis hingeschrieben haben.

Für die Zahl, die im Dezimalsystem durch das Kodewort 683 dargestellt wird, erhalten wir auf diese Weise für das Dualsystem das Kodewort 1010101001.

$$\begin{array}{ll} 683 : 512 = 1, & \text{Rest: } 171 \\ 171 : 256 = 0, & \text{Rest: } 171 \\ 171 : 128 = 1, & \text{Rest: } 43 \\ 43 : 64 = 0, & \text{Rest: } 43 \\ 43 : 32 = 1, & \text{Rest: } 9 \\ 9 : 16 = 0, & \text{Rest: } 9 \\ 9 : 8 = 1, & \text{Rest: } 1 \\ 1 : 4 = 0, & \text{Rest: } 1 \\ 1 : 2 = 0, & \text{Rest: } 1 \\ 1 : 1 = 1 & \end{array}$$

Es scheint seltsam, dass wir auf einem ziemlich komplizierten und nicht sofort verständlichen Weg zum Zählen der "Wilden" "okosa, urapun" zurückkehren. Die Vorteile der Zahlendarstellung im Dualsystem werden aber sofort klar, wenn man das Rechnen im Dezimalsystem mit dem Rechnen im Dualsystem vergleicht.

Beim Rechnen mit Dezimalzahlen muss der Rechner nicht nur die Regeln, sondern auch ziemlich lange Additions- bzw. Multiplikationstabellen kennen. Als Kinder haben wir am Lernen des "kleinen Einmaleins" wohl kaum Freude gehabt, und das "Einsundeins" der einstelligen Zahlen machte nur deshalb keine Mühe, weil wir uns diese Tabelle und jedes Ergebnis einzeln im Laufe einer langen Zeit eingeprägt haben.

Woher wissen wir denn, dass  $4 + 3 = 7$  ist? Diese Tatsache muss man entweder auswendig lernen oder jedesmal neu herleiten, indem man etwa Striche, Finger o. ä. durchzählt.

Ein Rechner, der das Dualsystem benutzt, kann das ganze "dezimale Einmaleins" und das ganze "Einsundeins" bis auf die folgenden Aussagen vergessen:

$$0 + 0 = 0; \quad 0 + 1 = 1; \quad 1 + 1 = 10$$

und

$$0 \cdot 0 = 0; \quad 0 \cdot 1 = 0; \quad 1 \cdot 1 = 1$$

Alles andere ergibt sich automatisch. Daher sagt man, die "duale" Arithmetik sei eine Arithmetik, bei der man nicht zu rechnen braucht. Ein Mensch, der an die duale Arithmetik gewöhnt ist, überblickt ihre Zahlen und benötigt die Umrechnung in Dezimalzahlen nicht. Er könnte ohne weiteres beliebige (lösbare) Aufgaben im Dualsystem lösen und brauchte gleichzeitig keine Ahnung davon zu haben, dass zwei mal zwei gleich vier ist.

Kehren wir nun wieder zu den betrachteten Rechengertäten zurück. Die ersten Rechenmaschinen rechneten in dem uns geläufigen Dezimalsystem, und ebenso steht es auch heute noch um alle einfachen Maschinen. Im Prinzip können aber auch diese Geräte so gebaut werden, dass sie z. B. mit Dualzahlen operieren.

Wir betrachten als Beispiel ein duales Rechenbrett, ein Gerät, das wie der arithmetische Rechenstab nirgends und niemals verwendet worden ist; wir tun das nur, um das Gesagte zu veranschaulichen.



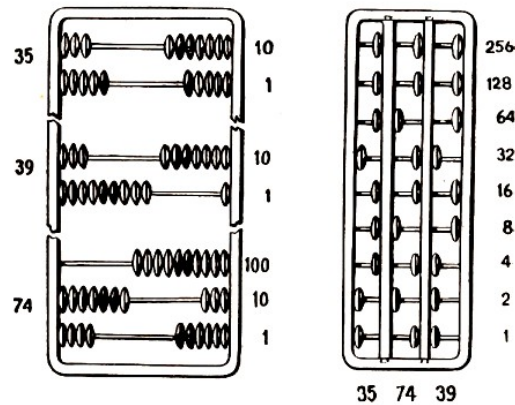


Bild 12.11.: Gegenüberstellung des üblichen dezimalen Rechenbretts (links) und eines dualen Rechenbretts mit Registern (rechts). In den Rechenbrettern sind die Zahlen 35, 39 und ihre Summe 74 eingestellt. Auf dem dezimalen ist die Summe unten, auf dem dualen in der Mitte abzulesen. Man beachte, dass die Zahlen dabei unterschiedlich in Stellenwerte zerlegt werden müssen: Für das dezimale Rechenbrett sind diese Zerlegungen  $35 = 30 + 5$ ,  $39 = 30 + 9$  und  $74 = 70 + 4$ , für das duale  $35 = 32 + 2 + 1$ ,  $39 = 32 + 4 + 2 + 1$  und  $74 = 64 + 8 + 2$ .

Ein dezimales Rechenbrett hat der Grundzahl 10 entsprechend auf jedem Draht zehn Kugeln, und man erwartet daher, dass ein duales Rechenbrett je zwei Kugeln für jede Stelle hat.

Praktisch ist die zehnte Kugel des gewöhnlichen Rechenbretts überflüssig. Stehen nämlich neun Kugeln links (an der betrachteten Stelle steht die Ziffer 9), so braucht man, um an dieser Stelle eine Einheit hinzuzufügen, z. B. einen Zehner, wenn es sich um den zweiten Draht handelt, nicht die zehnte Kugel nach links zu schieben, da anschließend eine Stellenübertragung erfolgt: Man schiebt gewöhnlich gleich alle neun Kugeln nach rechts und an der nächsthöheren Stelle eine Kugel nach links.

Mit anderen Worten: Das Hinzufügen einer Einheit, die zu einer Stellenübertragung führt, kann dadurch erfolgen, dass man direkt die Übertragung durchführt und eine Null an die gegebene Stelle setzt.

Daher reicht bei einem dualen Rechenbrett eine Kugel je Draht aus: Kugel rechts bedeutet Null, Kugel links Eins.

Ein solches Rechenbrett ist schmal im Vergleich zu einem gewöhnlichen; daher kann man es durch "Register" ergänzen, d.h. durch Einrichtungen, mit deren Hilfe man sich die Zahlen merken kann, mit denen man rechnet. Das sind ebensolche Drähte mit Kugeln, genaue Kopien des Rechenbretts, die auf beiden Seiten angefügt sind.

Da es für die Stellenwerte im Dualsystem keine traditionellen Bezeichnungen wie z. B. "Tausend" und "Millionen" im Dezimalsystem oder der exotischen "okosa - urapun" gibt, kann man sich diese Zahlen schwer merken.

Daher stellen wir zunächst einen Summanden im linken Register und den anderen im rechten ein und führen dann erst auf dem mittleren Rechenbrett die Addition aus, und zwar erzeugen wir das Ergebnis, indem wir bei der untersten Stelle beginnen und schrittweise nach oben gehen.

Dabei brauchen wir nicht zu rechnen, sondern nur logische Operationen durchzuführen, die sich mit den Mitteln des Aussagenkalküls beschreiben lassen.

Die Aussage "Auf dem  $n$ -ten Draht des rechten Registers steht die Kugel links" bezeichnen wir mit  $R(n)$  ( $n$  ist eine der Zahlen 1, 2, ..., Anzahl der Drähte).

$\sim R(n)$  bedeutet dann, dass die Kugel auf dem  $n$ -ten Draht des rechten Registers rechts steht, d. h., dass die Stelle  $2^{n-1}$  mit 0 besetzt ist.

Ganz analog sei mit  $L(n)$  die Aussage "Auf dem  $n$ -ten Draht des linken Registers steht die Kugel links" angedeutet. Zur Bezeichnung der Aussagenverbindungen "genau dann, wenn", "und", bzw. "oder" benutzen wir die Symbole " $\leftrightarrow$ ", " $\wedge$ " bzw. " $\vee$ ".

Wenn wir in das rechte Register die Zahl 39 (im Dualsystem: 100111) eingegeben haben (und das Register 9 Drähte besitzt), dann ist die Aussage wahr, die wir unter Benutzung der verabredeten Abkürzungen folgendermaßen schreiben können:

$$\sim R(9) \wedge \sim R(8) \wedge \sim R(7) \wedge R(6) \wedge \sim R(5) \wedge \sim R(4) \wedge R(3) \wedge R(2) \wedge R(1)$$

Gehen wir in das linke Register die Zahl 35 (im Dualsystem: 100011) ein, dann ist die Aussage

$$\sim L(9) \wedge \sim L(8) \wedge \sim L(7) \wedge L(6) \wedge \sim L(5) \wedge \sim L(4) \wedge \sim L(3) \wedge L(2) \wedge L(1)$$

wahr. Nun bilden wir im mittleren Register die Summe beider Zahlen. Ganz entsprechend stehe  $M(n)$  für die Aussage "Auf dem  $n$ -ten Draht des mittleren Registers befindet sich die Kugel links". Mit  $\ddot{U}(n)$  bezeichnen wir die Aussage "Bei der Addition entsteht auf dem  $n$ -ten Draht ein Übertrag zum  $(n+1)$ -ten Draht. Damit im mittleren Register die Summe der beiden Zahlen erscheint, müssen folgende Aussagen richtig sein:

$$M(1) \leftrightarrow [R(1) \vee L(1)] \wedge \sim \ddot{U}(1)$$

wobei

$$\ddot{U}(1) \leftrightarrow R(1) \wedge L(1)$$

und für alle  $n = 2, \dots, 9$ :

$$M(n) \leftrightarrow [R(n) \wedge \sim L(n) \wedge \sim \ddot{U}(n-1)] \vee [\sim R(n) \wedge L(n) \wedge \sim \ddot{U}(n-1)] \\ \vee [\sim R(n) \wedge \sim L(n) \wedge \ddot{U}(n-1)] \vee [R(n) \wedge L(n) \wedge \ddot{U}(n-1)]$$

wobei

$$U(n) \leftrightarrow [U(n-1) \wedge R(n)] \vee [\ddot{U}(n-1) \wedge L(n)] \vee [L(n) \wedge R(n)]$$

und schließlich:  $\sim \ddot{U}(9)$ , denn vom neunten Draht kann ja kein Übertrag mehr ausgeführt werden, weil kein zehnter existiert.

In unserem Beispiel sind die Aussagen  $R(1)$ ,  $L(1)$  wahr, also auch  $R(1) \wedge L(1)$  und damit  $\ddot{U}(1)$ . Daher ist  $\sim \ddot{U}(1)$  falsch, also auch  $[R(1) \vee L(1)] \wedge \sim \ddot{U}(1)$ , mithin ist  $M(1)$  falsch. Auf dem ersten Draht des mittleren Registers steht die Kugel also nicht links, sondern rechts.

Da  $\ddot{U}(1)$ ,  $R(2)$ ,  $L(2)$  wahre Aussagen sind, ist die Aussage  $[R(2) \wedge L(2) \wedge \ddot{U}(1)]$  wahr, also auch  $M(2)$ . Auf dem zweiten Draht des mittleren Registers steht die Kugel demnach links. Die Aussage  $\ddot{U}(2)$  ist wahr, denn  $\ddot{U}(1)$  und  $R(2)$  sind wahre Aussagen.

$M(3)$  ist falsch und  $\ddot{U}(3)$  ist wahr, denn  $\ddot{U}(2)$  ist wahr und  $R(3)$  ist wahr. Auf dem dritten Draht des mittleren Registers steht die Kugel also rechts. Da  $\ddot{U}(3)$  wahr ist und  $R(4)$ ,  $L(4)$  beide falsch sind, ist  $M(4)$  wahr und  $\ddot{U}(4)$  falsch.

Ebenso sieht man leicht ein, dass Aussagen  $M(5)$ ,  $M(6)$ ,  $M(8)$  und  $M(9)$  falsch sind,  $M(7)$  dagegen wahr, ferner dass  $\ddot{U}(5)$ ,  $\ddot{U}(7)$ ,  $\ddot{U}(8)$  und insbesondere  $\ddot{U}(9)$  falsch sind, während  $\ddot{U}(6)$  wahr ist. Im mittleren Register erscheint also das erwartete Ergebnis 001001010, nämlich die Dualdarstellung der Zahl 74.

Wir haben damit gezeigt, dass die Addition von Zahlen auf rein logische Umformungen ihrer Kodewörter im Dualsystem reduziert werden kann. Ebenso steht es mit den anderen Rechenoperationen. Damit ist aber die Grundlage für den Übergang von mechanischen Rechenmaschinen zu elektronischen Rechenautomaten gegeben.

Wir haben bereits gesehen, dass man die logischen Verknüpfungen leicht durch relativ einfache elektronische Schaltungen realisieren kann. Aus diesen Grundsaltungen lassen sich nach den angegebenen Formeln Additionsschaltungen gewinnen. Die digitalen Rechenautomaten rechnen also eigentlich gar nicht, sondern führen nur aussagenlogische Umformungen mit Kodewörtern durch. Daher nennt man diese Automaten manchmal auch "logische Maschinen".

Dass man logische Verknüpfungen mechanisch realisieren kann, war schon früher bemerkt worden, so von Charles Stanhope (1753-1816) und W. S. Jevons (1835 bis 1882), der 1869 ein "logisches Piano" konstruierte - die erste Maschine, die logische Probleme schneller lösen konnte, als das ohne Maschine möglich ist. Natürlich erfassten die Operationen, die Jevons ausführte, indem er die Tasten seines "klugen Instruments" drückte, das, was wir heute als Logik bezeichnen, nur unvollständig.

Erst nach hundert Jahren schenkte man den logischen Maschinen wieder Aufmerksamkeit. Die Anregung dazu erfolgte erstens durch die Bedürfnisse der Elektrotechnik und zweitens durch die Erfolge der Mathematik, die inhaltsreichere logische Systeme geschaffen hatte.

Zeichnet man die Schaltung der elektrischen Ausrüstung einer modernen Maschine, beispielsweise einer Rotationspresse oder einer automatischen Werkzeugmaschine, auf ein Blatt, so erinnert sie an ein Spinnennetz, deren Knotenpunkte die Schalter sind. Wohin der Strom bei irgendeiner Kombination der Schalterstellungen fließt, ist mitunter schwer zu bestimmen. Ein eingearbeiteter Ingenieur findet übrigens fast immer die Möglichkeit, durch Verwendung zweckmäßiger Schaltungsvarianten einige Kontakte einzusparen - das verbilligt die Maschine nicht unbedeutend und erhöht ihre Zuverlässigkeit. In der Elektrotechnik gibt es sogar ausgesprochene "Schaltungsspezialisten", die sich nur dafür interessieren, möglichst einfache und zuverlässige Schaltungen zu entwerfen.

Als man entdeckt hatte, dass sich Relais-Kontakt-Schaltungen durch Ausdrücke des Aussagenkalküls beschreiben lassen, tauchte die Idee auf, Geräte zu schaffen, die in der Lage sind, irgendeine Schaltung, die in dieser Weise beschrieben ist, zu analysieren, ihr elektrisch gleichwertige Schaltungen zu finden und diejenige Schaltung auszusuchen, die am vorteilhaftesten ist, d. h. Analysatoren und Synthetisatoren von Relaischaltungen zu schaffen.

Den ersten Analysator baute Shannon im Jahre 1953. In der UdSSR entwickelte der Ingenieur P. Parchomenko einen Analysator, und W. Roginski und W. Lasarew bauten einen Synthetisator von Relaischaltungen. Diese Maschinen wurden notwendig, da es (abgesehen vom praktisch undurchführbaren Durchprobieren aller Schaltungen mit weniger Kontakten) kein systematisches Verfahren gibt, nach dem man gegebene Schaltungen vereinfachen kann. Mit den Methoden des Aussagenkalküls kann man nur die Gleichwertigkeit zweier schon gefundener Ausdrücke bzw. Schaltungen feststellen. Folglich muss man die Umformung auf gut Glück oder in gewissen wahrscheinlichen Richtungen vornehmen und dann die Ergebnisse vergleichen. Das ist natürlich eine mühselige Angelegenheit, und man strebt an, sie einer Maschine zu übertragen.

Ein Synthetisator von Relaischaltungen schafft keine neue Information. Diese ist ganz in den Einschränkungen enthalten, die der Schaltung durch ihre Aufgaben auferlegt sind. Der Syn-

thetisator ist aber in der Lage, den Gehalt der Information zu erhöhen, diese in ihrer Form zu vervollkommen. Automaten, die eine solche Operation mit ihrer inneren Information vornehmen, d. h. mit der in ihrer Struktur und ihren Speichern vorhandenen Information, bezeichnet man als selbstorganisierende Systeme.

Selbstorganisierende Maschinen ermöglichen es, die Sammlung von Information bei einem unveränderlichen und voll ausgenutzten Gedächtnisvolumen weiterzuführen. Das ist eine sowohl vom theoretischen als auch vom praktischen Standpunkt sehr interessante Eigenschaft.

Die Einfachheit ist nur dann ein nützliches Kriterium für die Auswahl eines Modells, wenn durch diese Auswahl kein allgemeineres Kriterium verletzt wird. Von zwei adäquaten Modellen ist das zweckmäßiger, das einfacher ist; spiegelt aber das Modell sein Objekt nicht richtig wider, so hat seine Einfachheit keinen Sinn, wie W. I. Lenin bei seiner Kritik des "Prinzips der Denkökonomie" bemerkte.

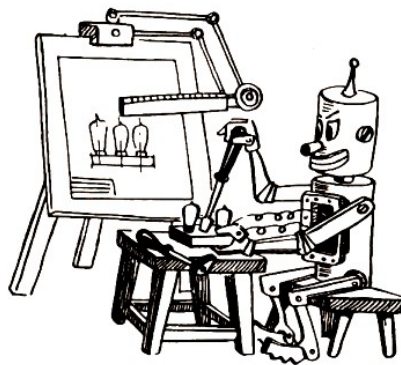


Bild 12.12.: Der Gedanke an einen Mechanismus, der sich selbst vervollkommnet, ist, wenn man ihn wörtlich nimmt, ziemlich sonderbar.

Die Entwicklung der logischen Automaten erhielt eine neue Anregung durch die Aufstellung einer allgemeinen Theorie des zweckmäßigen Verhaltens, deren Grundlagen von Emile Borel und John von Neumann geschaffen wurden. Sie erhielt die etwas oberflächliche Bezeichnung Spieltheorie. Der Grund dafür ist, dass beim Spielen sehr einfache Formen zweckmäßigen Verhaltens zu beobachten sind, die einer Analyse und Modellierung verhältnismäßig leicht zugänglich sind.

Dem Spielen der Kinder zum Beispiel liegen Dinge und Ereignisse aus dem Leben der Erwachsenen zugrunde, aber die Situationen und das Verhalten sind dabei vereinfacht. Das Schachspiel war einst ein Modell der Kriegsführung. Seit jenen Zeiten hat sich die Kriegsführung unermesslich kompliziert, während umgekehrt die Regeln des Schachspiels einfacher und strenger wurden.

Unter allen der Menschheit bekannten Spielen existieren zwei Extreme: Während bei den einen Spielen die Kenntnis einer mehr oder weniger komplizierten Anweisung für das Verhalten (einer Strategie) einem Spieler den Erfolg sichert, ist bei den anderen alles dem Zufall überlassen. "Rate, welches Ohr klingt?" fragt einer der Spieler den anderen. Im allgemeinen ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es das rechte Ohr ist, gleich der Wahrscheinlichkeit dafür, dass das linke Ohr klingt. Erfolg oder Misserfolg bleibt dem Zufall überlassen, solange der Fragende nicht "schummelt".

Fast alle realen Spiele gehören jedoch weder zu dem einen noch zu dem anderen Extrem, Glück und Kniffe sichern bei ihnen den Sieg nur teilweise. Wird "Rate, in welcher Hand das Streichholz ist!" gespielt, so wird es dem Fragenden bei aller Mühe nicht gelingen, vollkommen zufällig zu entscheiden, in welcher Hand er das Streichholz verstecken soll.

Es existiert in einer Reihe aufeinanderfolgender Entscheidungen eine gewisse Korrelation, und wenn der Ratende diese erfasst, so gewinnt er in der Mehrzahl der Fälle. Wenn aber der Ratende sagt, was ihm gerade einfällt, so ist es Sache des Versteckenden, dessen Entscheidung vorauszusehen und das Streichholz in der anderen Hand zu verstecken. In der Reihe der Entscheidungen

...100010001101100001000010001000...

in der 0 "links" und 1 "rechts" bedeutet, stellt eine Maschine leicht fest, dass der Spieler die linke Hand der rechten vorzieht und dass er diese, nachdem er die rechte Hand gewählt hat, eher dreimal als zweimal oder viermal als Versteck benutzt.

Diese Überlegung legte der Ingenieur D. Hagelbarger der Konstruktion eines Automaten zugrunde, der "Zahl oder Wappen" spielt. Das ist eine der interessantesten spielenden Maschinen der Gegenwart. Die Maschine spielte mit Angestellten der Bell-Company in New Jersey (USA) fast zehntausend Partien, von denen sie 5200 gewann und 4500 verlor. Aber am spannendsten war der Wettkampf mit einem Automaten, den C. Shannon für das gleiche Spiel gebaut hatte.

"Es wurde eine dritte Maschine gebaut, ein Schiedsrichter", so erinnerte sich Shannon, "die die Maschinen über die Ergebnisse der 'Partien' informierte, die Augen zählte und dafür sorgte, dass das Spiel den Regeln entsprechend geführt wurde. Die Maschinen waren verbunden und spielten mehrere Stunden, während die Zuschauer kleine Wetten abschlossen und das Spiel mit lauten Ausrufen begleiteten. Die kleinere und, wie man angenommen hatte, weniger "kluge" Maschine besiegte die größere etwa im Verhältnis 55 zu 45.

Möglicherweise lag das daran, dass sie ihre Strategie schneller änderte. Beide Maschinen bemühen sich, das Spielschema (die Strategie) der anderen zu finden, und sobald eine dieses gefunden hatte, begann die andere zu verlieren und wechselte ihre Strategie."<sup>52</sup>

Bei manchen Spielen der zuerst genannten Art gibt es für einen Spieler eine optimale Strategie, die unter allen Umständen zu seinem Sieg führt. Von dieser Art ist zum Beispiel das Schachspiel "Turm und König gegen König".

Der Spieler, der Turm und König führt, kann dieses Endspiel immer gewinnen, wie sein Gegner auch zieht. Eine Maschine, die dieses Spiel nach einer optimalen Strategie spielt (und gewinnt), baute der spanische Erfinder Torres y Quevedo 1914. Im Jahre 1939 wurde eine logische Maschine für das Spiel "Nim" gebaut und 1940 eine für das Spiel "Kreuz und Null". Beide realisieren eine optimale Strategie, die sich aus den Spielregeln ergibt.

Eine Maschine, die ein Spiel spielt, für das es keine optimale Strategie gibt oder für das keine bekannt ist, muss in ihren Strategien variabel sein, sie muss über eine ganze Menge möglicher Strategien verfügen und diese nach der Methode "Versuch und Irrtum" ausprobieren und eventuell neue, bessere Strategien erzeugen.

Es gibt ein Spiel "Hex", das man auf einem Brett spielt, das in regelmäßige Sechsecke eingeteilt ist und an eine Fläche von Bienenwaben erinnert. Einer der Spieler strebt danach, mit seinen Figuren eine zusammenhängende Kette vom oberen zum unteren Rand des Brettes zu bilden, und der andere vom rechten zum linken Rand.

E. Moore und C. Shannon gelang es, diese Regeln durch ein Netz von Widerständen zu modellieren und eine Maschine für das Spiel "Hex" zu bauen.

Natürlich wird niemand ernsthaft mit einer Maschine im Spiel wetteifern, ebenso wie kein Läufer einen "Wettstreit" mit einem Automobil austrägt. Die spielenden logischen Maschinen sind

---

<sup>52</sup>C. E. Shannon: Game playing machines. J. Frankling Inst. 260, Nr. 6. 1955. Seite 447 bis 453.)

dadurch interessant, dass die Arbeit an ihnen dazu beiträgt, die Theorie des zweckmäßigen Verhaltens exakt zu formulieren, durch Experimente zu überprüfen und Strukturen zu finden, die ein solches Verhalten realisieren.

Bei Vorführungen spielender Maschinen setzt uns natürlich die Feststellung in Erstaunen, dass die Maschine vorausberechnete Züge macht, dass sie irgendwie die zukünftigen Ereignisse voraussieht und sich bemüht, sie zu ihren Gunsten zu wenden.

Solange wir die Methode nicht kennen, ist es uns gleichgültig, ob die Maschine vollständig determiniert ist wie der Automat von Torres y Quevedo, oder ob sie statistisch arbeitet wie die Maschine für das Spiel "Zahl oder Wappen" und selbst Strategien sucht, bei deren Verwendung sie gewinnt.

Solange man sich mit ihrem Aufbau nicht befasst hat, kann man vermuten, dass dieser durch die Anforderungen des jeweiligen Spiels bedingt ist und dass dieser Maschinen-Müßiggänger zu nichts anderem nütze ist.

Dieses Urteil wäre aber unvorsichtig. Letzten Endes leitet die Spieltheorie Strategien her, die für ganze Klassen von Spielen geeignet sind und sogar für alle Spiele, die es auf der Welt gibt und die noch erfunden werden können. Ihre Methoden erweisen sich für die Planung von militärischen Aktionen während eines Krieges und für die Analyse aller möglichen Situationen des täglichen Lebens als brauchbar.

Es ist klar, dass ihnen entsprechende logische Maschinen durch praktische Ratschläge in schwierigen Situationen Nutzen bringen und auch die Prinzipien voraussagen können, die den Mechanismen zugrunde liegen, die unser Verhalten steuern.

Solche logischen Maschinen braucht man nicht erst neu zu konstruieren, jede programmgesteuerte Rechenanlage kann, sofern nur ihr Speichervolumen zur Aufnahme des entsprechenden Programms ausreicht, an einem beliebigen Spiel teilnehmen, sogar an dem kompliziertesten und angesehensten, dem Schachspiel.

Man kann sich beim Programmieren darauf beschränken, die Maschine durch das Programm an die Spielregeln zu binden und ihr das Streben nach dem Sieg einzugeben, sie im übrigen aber ihre Strategien völlig zufällig wählen zu lassen. Das hat aber nur dann Sinn, wenn die Maschine befähigt ist, sich ihre Strategien mit ihrem Erfolg bzw. Misserfolg zu merken. Hat die Maschine das Spiel viele Male gegen verschiedene Gegner gespielt, so beginnen sich die erfolgbringenden Strategien von den übrigen abzuheben.

Die Maschine findet auf diese Weise durch "Versuch und Irrtum" Strategien, die die Spieltheorie aus den Spielregeln ableitet. Natürlich hat dieses Verfahren nur bei solchen Spielen Sinn, für die es solche Strategien gibt - bei Roulette, Lotto oder Würfelspielen gibt es z. B. solche Strategien nicht. Natürlich kann man das Verfahren auch abkürzen und gleich die allgemeinen Regeln einer zum Sieg führenden Strategie programmieren.

So gab das Dominoprogramm, das man für die sowjetische Maschine "Strela" aufgestellt hatte, der Maschine die Möglichkeit, von der ersten Partie an völlig richtig zu spielen und zusammen mit einem Operateur zwei andere zu besiegen.

Analog ist der Aufbau eines Programms für eins der kompliziertesten Spiele, das die Menschheit erfunden hat, das Schachspiel. Man hat ausgerechnet, dass es etwa  $2 \cdot 10^{116}$  Varianten dieses Spiels gibt; niemand wird jemals in der Lage sein, sie alle durchzuprobieren, um dann zu prüfen, welche Strategie am ehesten zum Sieg führt, und zu beweisen, dass es keine bessere gibt.

Ein Programm des Schachspiels sieht vor, dass die Maschine die gegebene Stellung der Figuren und die Stellung nach ihrem Zug, nach dem wahrscheinlichsten Zug des Gegners usw. mehrere

Züge im voraus beurteilt.

Von erfahrenen Schachspielern wurde eine Liste aufgestellt, die jeder Schachfigur in Abhängigkeit von ihrem Rang und ihrer Stellung auf dem Brett eine Punktzahl zuordnet. Diese Liste ermöglicht es, die Beurteilung der Situationen auf eine einfache Addition von Punkten und den Vergleich ihrer Summen zurückzuführen. Die vorliegende Maschinentaktik hat gegenüber der menschlichen gewisse Vorzüge, da die Maschine bei ihrer Prüfung der Stellung keine Figur oder ein Matt "übersehen" kann, dafür besitzt sie aber noch nicht die kombinatorische Wendigkeit eines Schachmeisters, der mit der Theorie der Eröffnungen und der Endspiele vertraut ist, große Erfahrung in der Beurteilung der Stellung besitzt und den "Stil" des Gegners kennt.

Hätten wir eine Maschine mit einem sehr großen Speicher zur Verfügung, so könnten wir ihr das Schachspielen grundsätzlich anders beibringen. Man würde der Maschine nur die Aufzeichnungen und Ergebnisse aller jemals wirklich gespielten Partien zuleiten. Die Maschine könnte selbständig statistische Angaben darüber sammeln, welche Fortsetzung in einer gegebenen Situation wahrscheinlich die beste ist.

Sie würde nicht mit absoluten Verboten oder richtunggebenden Hinweisen, die ein Schachlehrer in das Programm eingebaut hat, arbeiten, sondern mit den tiefer liegenden Ergebnissen der fremden und der eigenen Erfahrung. In den Fällen, in denen mehrere erfahrungsgemäß gleich starke Fortsetzungen existieren, würde die Maschine extrapolieren, riskieren. Zweifellos würde das ein sehr interessantes Spiel. Aber das Gedächtnisvolumen und die Arbeitsgeschwindigkeit der heutigen Maschinen ermöglichen es leider nicht, rein statistische Strategien für das Schachspiel zu realisieren.

Derartige statistische Angaben stehen übrigens auch dem Menschen als Schachspieler zum mindesten nicht in ausreichender Fülle zur Verfügung. Er spielt nicht vollkommen statistisch, denn sonst brauchte er die Theorie der Eröffnungen und der Endspiele nicht zu studieren. Der Mensch geht von einer intuitiven Statistik zur scharfen Logik über und umgekehrt, er nutzt also das Gedächtnisvolumen und die Arbeitsgeschwindigkeit, die ihm die Natur verliehen hat, aus.

Wenn Schach nicht zum Sport gehören würde, so könnte man zu den natürlichen Gaben des Menschen die Fähigkeiten der Maschine hinzufügen und damit seine Spielweise bis zu einer bestimmten Grenze verbessern.

Und eine solche Grenze existiert für das Schachspiel: Die Theorie zählt es zu den Spielen mit "vollständiger Information". Da die Ausgangsstellung und die Regeln des Schachspiels kein Rauschen, kein zufälliges Element enthalten, existiert im Prinzip eine eindeutig bestimmte beste Spielweise für jede Seite, die in der Spieltheorie durch einen sogenannten "Sattelpunkt" bestimmt wird. Könnte man diese optimale Strategie praktisch finden, so würde das Schachspiel seine Anziehungskraft verlieren und aussterben.

Das bedeutet: Die gesamte Information über die optimale Strategie ist in den Spielregeln enthalten und kann - im Prinzip - von einem Rechenautomaten mit einem ungeheuren Gedächtnis und einer hohen Arbeitsgeschwindigkeit aus diesen Regeln hergeleitet werden. Da aber die "ideale Schachmaschine" für unsere Technik vorläufig ebenso utopisch ist wie der "Laplacesche Dämon", wird Information durch Versuche gesammelt. Die Information ist daher unvollständig und sehr redundant, und das können wir fürs erste nicht ändern.

Jedes zweckmäßige Verhalten eines oder mehrerer Systeme kann man sich natürlich als Spiel vorstellen, wobei die Kriterien der Zweckmäßigkeit durch die Auszahlungsfunktionen<sup>53</sup> dieses

---

<sup>53</sup>Diese Funktionen geben den Gewinn bzw. Verlust der am Spiel Teilnehmenden in Abhängigkeit von der

Spiels widerspiegelt werden.

Die Kompliziertheit der "Spiele", die unser gesellschaftliches und persönliches Leben ausmachen, übersteigt die Kompliziertheit des Schachspiels bei weitem, und niemand kann hoffen, dass eine Spieltheorie irgendwann einmal exakte Regeln für die beste Lebensstrategie liefern könnte. Es gibt aber zwei Klassen von Spielen. Die einfachere vernachlässigt die Rückwirkung der von uns gewählten Strategie auf die Ursachen, die ein unmittelbares Erreichen des Ziels verhindern. So "spielen" wir mit der Natur.



Bild 12.13.: Nur ein linearer Übertragungskanal zwischen dem Zentrum, das den Gewinn berechnet, und dem Zentrum, das die Strategie bestimmt, macht die Maschine zu einem leidenschaftslosen objektiven Spieler. Ein nichtlinearer Kanal bringt eine Subjektivität in das Automaten-Spiel hinein.

Eine "arme" Maschine neigt zur Überschätzung von Gewinnen und Verlusten, eine "reiche" Maschine unterschätzt sie. Bei einer "verzweifelten" Maschine, die unbedingt eine bestimmte Summe gewinnen muss, hat dieser Übertragungskanal eine Relaischarakteristik.

In der Gesellschaft muss man aber manchmal auch einen aktiven Widerstand hinnehmen: Der Feind versucht zu extrapolieren, d. h. unser zukünftiges Verhalten an Hand unserer vorangegangenen "Züge" vorzusagen. Auch wenn er theoretisch genommen nicht stärker ist, so kann ihm solche Scharfsichtigkeit im Spiel einen Vorteil verschaffen.

Es wäre falsch, zu glauben, dass sich das maschinelle Spiel wie überhaupt das Verhalten von Maschinen unbedingt durch eine deprimierende Korrektheit und Unfehlbarkeit der Verfahren und Beurteilungen auszeichnen muss. Natürlich sind die Maschinen zu einem solchen exakten Spiel besser geeignet als die Menschen.

Die Mathematiker J. Kemeny und G. Thompson haben aber gezeigt, dass allein ein nichtlineares Übertragungsglied zwischen dem Zentrum zur Beurteilung der Spielsituation und dem Zentrum, das die Entscheidung über die Züge trifft, dem maschinellen Spiel eine Individualität, einen besonderen Charakter und Geschmack verleiht.

Zwei ganz einfache Nichtlinearitäten, die Überschätzung der Gewinne bei einer Unterschätzung der Verluste bzw. das Umgekehrte, machen die Maschine waghalsig (im ersten Fall) bzw. übervorsichtig, feige (im zweiten Fall). Die Unterschätzung hoher Gewinne bei sich selbst und beim Gegner ist charakteristisch für einen Spieler, der über große Mittel verfügt, umgekehrt überschätzt ein armer Spieler gewöhnlich seine Gewinne und Verluste.

Grafisch werden die Nichtlinearitäten dieser beiden Verhaltensweisen durch S-förmige Kurven

---

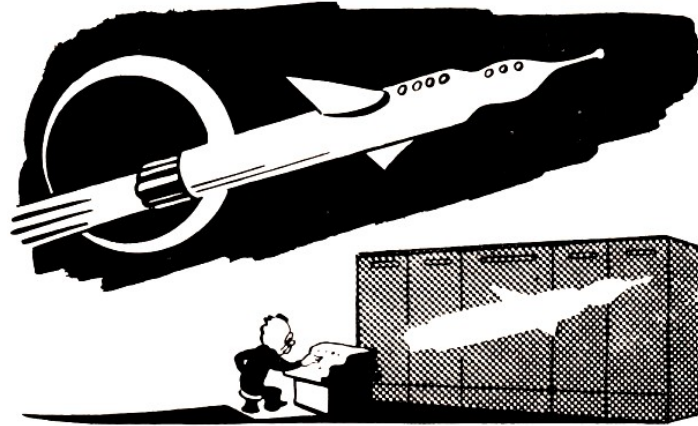
Schlussstellung an.



wiedergegeben. Eine Sprung- oder Relaischarakteristik in diesem Übertragungsglied erzeugt, wie sich herausstellt, das Verhalten eines verzweiferten Spielers, der unbedingt eine bestimmte Summe gewinnen muss, etwa um Schulden zu bezahlen. Ihn kümmern Verluste und kleine Gewinne wenig, aber auch einen sehr großen Gewinn braucht er nicht unbedingt.

Daraus wird klar, dass solche Nichtlinearitäten es erlauben, viele Charakterzüge und Handlungsweisen der Menschen mathematisch exakt wiederzugeben und das Verhalten der Menschen unter verschiedenen Umständen zu modellieren. Das übliche Bild der leidenschaftslosen Maschine, des Pedanten, das sich von einem utopischen Werk auf das andere vererbt, gibt es in der modernen Spieltheorie nicht mehr. Die heutigen spielenden Maschinen sind imstande, weit mehr zu leisten, von den zukünftigen ganz zu schweigen.

## 13 Automatisches Rechnen, eine der bemerkenswertesten Errungenschaften unserer Zeit



Der Traum eines genialen Mathematikers - Erste Zähler aus Elektronenröhren - Raketen und Rechenmaschinen - Programm und Kontrolle - Zwei Entwicklungswege der elektronischen Maschinen - Die Leitung der Wirtschaft erfordert eine neue Theorie - Die Informationsinflut - Eine Maschine fragt: "Was fehlt Ihnen?" - Maschinen als Übersetzer und Schriftsteller

Wissenschaftliche Ideen eilen ihrer technischen Anwendung und Realisierung manchmal um Jahrhunderte voraus. So erging es auch der Rechentechnik, als deren Begründer der englische Mathematiker Charles Babbage (1792-1871) aus Cambridge gilt.

Babbage hatte bemerkt, dass ein Rechner bei der Aufstellung einer Tabelle, beispielsweise einer Logarithmentafel, eine verhältnismäßig einfache Folge von Operationen viele Male wiederholt. Während des Rechenprozesses benutzt er die früher erhaltenen Ergebnisse. Einen solchen Prozess, bei dem man sich schrittweise dem gesuchten Resultat nähert, bezeichnet man als Iterationsprozess.

Babbage wollte solche Rechenprozesse automatisch arbeitenden Maschinen übertragen. Im Jahre 1822 begann er mit der Verwirklichung seines ersten Projekts, der "difference engine", einer Maschine zur Aufstellung von Funktionstabellen. Man baute etwa zehn Jahre an dieser Maschine, konnte sie aber nicht fertigstellen.

Im Jahre 1833 entwarf Charles Babbage einen universellen programmgesteuerten Rechenautomaten, die "analytical engine".

Die Maschine bestand aus einem Eingabewerk, das Lochkarten mit den Eingabedaten und dem Programm abtastete, einem Rechenwerk, einem Ausgabewerk und einem Speicher für tausend 50stellige Dezimalzahlen. Dieser Speicher wurde durch tausend Reihen von je 50 Ziffernrädern realisiert, die je 10 verschiedene Stellungen entsprechend den 10 Dezimalziffern annehmen konnten.

Jede Reihe dieser Räder konnte auf einen Befehl der Programmlochkarten hin die in ihm gespeicherte Zahl in das Rechenwerk, das arithmetische Operationen ausführte, übertragen. Das Ergebnis schickte die Maschine zurück in den Speicher und druckte es am Ende der Rechnung aus.

Charles Babbage selbst und dann sein Sohn bauten mit Unterbrechungen 70 Jahre an der Maschine (bis 1910), ohne sie zu vollenden. Die vorhandenen mechanischen Einrichtungen waren zur Verwirklichung des genialen Plans ungeeignet. Nur diese technischen Unvollkommenheiten

ließen den Plan scheitern - ein späterer Nachbau durch den schwedischen Ingenieur Scheutz bewies die Tragkraft der Ideen von Charles Babbage.

Erst in den dreißiger Jahren wurde die Entwicklung universeller Rechenautomaten wieder aufgenommen. Zu dieser Zeit stellte die Elektrotechnik schon zuverlässige und schnell arbeitende Bauelemente für solche Maschinen zur Verfügung. Rechenautomaten auf Relaisbasis entstanden in den USA, in Deutschland, England, Schweden, Holland und in der UdSSR. Aber sie veralteten schnell; an ihre Stelle traten elektronische Maschinen, die eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit erreichen.

Im Jahre 1937 begann Howard Aiken, Professor an der Harvard-Universität in Cambridge (USA), mit der Entwicklung einer mechanischen programmgesteuerten Rechanlage "Mark I". Als Bauelemente benutzte er 72 dezimale 23stellige Addierwerke von handelsüblichen Bürorechenmaschinen. Die Anlage arbeitete also im Dezimalsystem und besaß einen Speicher für 60 24stellige Dezimalzahlen.

Die Anlage konnte sämtliche Grundrechenoperationen ausführen, ferner potenzieren und radizieren und erhielt Lochstreifenlesegeräte zum Ablesen der Funktionswerte der Funktionen  $\log x$ ,  $\sin x$ ,  $10 \cdot x$ . Die Anlage wurde 1944 fertiggestellt.

Im Jahre 1938 begannen Stibitz und Williams in New York mit der Konstruktion von reinen Relaisrechnern, jedoch zunächst für Spezialzwecke fest programmiert. Die ersten beiden programmgesteuerten Universalrechner in den USA entstanden in den Jahren 1944 bis 1946. Die 1947 von Aiken fertiggestellte Relaismaschine "Mark II" setzte sich aus 13000 elektromagnetischen Relais zusammen. Die Maschine arbeitete (im Gegensatz zu "Mark I") im Dualsystem.

Der erste Elektronenrechner war der ENIAC von Eckert und Manchley. Er wurde 1946 fertiggestellt und baute sich aus 18000 Elektronenröhren und 1500 Relais auf. Seine Rechengeschwindigkeit war etwa tausendmal so groß wie die von Relaismaschinen.

Völlig unabhängig von den Entwicklungen in anderen Ländern vollbrachte in Deutschland Konrad Zuse Pionierleistungen bei der Entwicklung automatischer Rechenanlagen. In den Jahren 1936 bis 1938 konstruierte er die "Z 1", eine rein mechanisch arbeitende programmgesteuerte Rechanlage, die bereits viele der wesentlichsten Konstruktionsprinzipien moderner Rechenautomaten realisierte. So arbeitete sie z. B. mit Dualzahlen.

Infolge der Unvollkommenheiten der mechanischen Einzelteile, die Zuse mit den primitivsten Mitteln selbst herstellen musste, arbeitete die Anlage nicht befriedigend. Im Jahre 1941 stellte Zuse die erste voll funktionsfähige programmgesteuerte Rechanlage der Welt, die "Z 3" fertig.

Die Maschine war aus elektromagnetischen Relais aufgebaut, besaß einen Speicher für 64 Zahlen zu 22 Dualstellen und erreichte eine Arbeitsgeschwindigkeit von 15 bis 20 arithmetischen Operationen je Minute. Eine Multiplikation dauerte 4 bis 5 Sekunden.

Das Programm wurde von einem Lochstreifen abgetastet. In den folgenden Jahren entwickelte Zuse (neben einigen Spezialgeräten) die "Z 3" zur "Z 4" weiter, die sich durch höhere Arbeitsgeschwindigkeit (25 bis 30 Operationen je Minute) und eine größere Stellenzahl auszeichnete. Durch den faschistischen Krieg blieb diese Entwicklung weitgehend unbekannt, sämtliche Maschinen (bis auf die "Z 4") und Unterlagen wurden bei Bombenangriffen vernichtet.

Das Rechenwerk der ersten elektronischen Rechenautomaten war ein Netz von elektronenröhrenbestückten Triggern, die entsprechend den zu realisierenden logischen Umformungen

geschaltet waren.

Zum ersten Mal hatte man Triggerschaltungen benutzt, um die Intensität von kosmischer oder radioaktiver Strahlung zu messen.

Dabei nutzte man den Umstand aus, dass die Strahlung ionisierend auf Gase wirkt. An zwei Elektroden, die sich in einem hochevakuierten Raum befinden, wird eine hohe Spannung angelegt. Fällt Strahlung in diesen Raum, so werden einige Gasmoleküle ionisiert, d. h., zwischen den Elektroden kann ein Strom fließen - es erfolgt ein Durchschlag.

In dem Stromkreis über die Elektroden entstehen Impulse, deren Anzahl der Intensität der einfallenden Strahlung proportional ist. Um diese Intensität zu messen, muss man also die Impulse zählen. Das ist aber mit den üblichen Methoden nicht möglich, sobald die Strahlungsintensität eine gewisse Schranke übersteigt.

Bei hoher Strahlungsaktivität folgen die Durchschläge so schnell aufeinander, dass man sie weder durch das Gehör noch mit Hilfe der üblichen mechanischen Zähler unterscheiden und zählen kann. Daher wurden elektronische duale Zähler zum ersten Mal in physikalischen Laboratorien verwendet.

Diese Zähler bestehen einfach aus einer Reihe hintereinandergeschalteter Trigger. Zu Beginn der Zählung sind alle Trigger in demselben Zustand, wir bezeichnen ihn mit „0“.

Der erste Impuls versetzt den ersten Trigger in den Zustand 1 (kippt ihn), der zweite zurück in den Zustand 0. Beim Übergang vom Zustand 1 in den Zustand 0 sendet der erste Trigger einen Impuls aus, der den zweiten kippt.

Der dritte Impuls kippt wieder den ersten Trigger, der vierte Impuls versetzt den ersten Trigger zurück in den Zustand 0, der dabei entstehende Impuls versetzt auch den zweiten Trigger in den Zustand 0, und der hierbei erzeugte Impuls kippt den dritten Trigger. Und so geht es weiter.

Nach Ablauf der Beobachtungszeit liest der Laborant an Anzeigelämpchen die Zustände der Trigger in der Schaltung ab und schreibt sie in Form von Nullen und Einsen auf. Er erhält damit eine Zahl im Dualsystem, die leicht in eine Dezimalzahl umzuformen ist. Zur Umformung wurden auch besondere Umrechnungsschaltungen gebaut.

Die Verwendung von elektronischen Zählern führte zu der Frage, ob es möglich sei, mit Hilfe elektronischer Schaltungen beliebige Rechenoperationen und Folgen davon auszuführen, insbesondere solche Folgen von Rechenoperationen, die zur Lösung von Gleichungen der höheren Mathematik notwendig sind.

Da die Reihenfolge der Operationen durch einen Menschen nicht mit ausreichender Geschwindigkeit gesteuert werden kann, wurde vorgeschlagen, die Reihenfolge der Operationen zu programmieren und von einem speziellen Teil der Maschine, dem Steuerwerk, steuern zu lassen.

Die erste elektronische Rechenmaschine ENIAC wurde an der Moore School of Electronic Engineering der Universität von Pennsylvania (USA) gebaut. Diese Maschine wurde 1944 fertiggestellt und dem militärischen Laboratorium für Ballistik in Aberdeen übergeben, ihre Existenz wurde aber geheimgehalten; erst nach Kriegsende im Februar 1946 wurde sie das erste Mal vorgeführt.

Wozu benötigte man sie in Aberdeen?

Gegen Ende des zweiten Weltkriegs zeigten neue schreckliche Waffen, die weitreichenden Raketen, ihre Vorzüge und Mängel. Die deutschen Fernraketen V 2 zerstörten Häuser in London, während ihre Abschussbasen unerreichbar an der belgischen Atlantikküste ständig gewechselt

wurden.

Es war klar, dass man die Sprengkraft der Raketenköpfe durch Verwendung von Atomsprengladungen wesentlich erhöhen und ihre Reichweite so steigern könne, dass die Raketen zum Beschuss anderer Kontinente geeignet sind. Die amerikanischen Militaristen waren überzeugt, dass sie dieses Ziel als erste erreichen würden und sich das Monopol an Kernwaffen und Raketen sichern könnten. Wir wissen heute, dass sich diese Hoffnungen nicht erfüllten.

Die Fachleute erkannten, dass die Zukunft der neuen Waffe davon abhängt, ob es gelingt, die Raketenflüge zu lenken. In dieser Hinsicht war die neue Waffe äußerst schwach: Die Raketen trafen nur ausgedehnte Objekte, z. B. Städte, aber keine sozusagen punktförmigen Ziele.

Die Berechnung der Flugbahn einer Rakete unterscheidet sich von der Berechnung der (ballistischen) Flugbahn eines Geschosses dadurch, dass die Rakete während des Flugs angetrieben wird und ihre Masse sich ständig verringert. Eine so komplizierte Bewegung im voraus zu berechnen, erwies sich als unpraktisch, da dazu die Berücksichtigung der Wetterlage, d. h. des Zustands der Atmosphäre, erforderlich ist und die Wetterlage ohne schwierige Rechnungen nicht geklärt werden kann.

Daraus leitete sich die Forderung ab, Rechenautomaten zu konstruieren, die so schnell arbeiten, dass sie aus Funkmesssignalen, die den Flug der Rakete an die Bodenstationen melden, die Abweichungen von der vorgeschriebenen Flugbahn so schnell berechnen und in Korrekturbefehle an die Steuereinrichtungen der Rakete umsetzen können, dass diese Korrekturbefehle die Rakete zu einem Zeitpunkt erreichen, an dem die Kursabweichung noch berichtigt werden kann.

Auch vor dem Start der Rakete sind umfangreiche Rechnungen notwendig, die man nur mit schnell arbeitenden automatischen Anlagen in der zu fordernden Zeit ausführen kann.

Vor dem Start der Rakete muss der Rechenautomat eine große Anzahl von Daten verarbeiten: Informationen über das Ziel (in Form seiner Koordinaten), über die Startmasse und die aerodynamischen Eigenschaften des Raketenkörpers; einen Wetterbericht für die Flugbahn. Diese Daten werden nach bestimmten Regeln in andere Angaben umgearbeitet, nämlich in die Startrichtung für die Rakete, den erforderlichen Brennstoffvorrat und vieles andere.

Ein programmgesteuerter Rechenautomat besteht im wesentlichen aus fünf Baueinheiten, nämlich dem Eingabewerk, dem Ausgabewerk, dem Steuerwerk, dem Rechenwerk und dem Speicher.

Das Eingabewerk übernimmt die zu verarbeitenden Daten und Programme in einem gewissen Kode (z.B. dem gewöhnlichen Buchstaben-Dezimalziffern-Kode), kodiert sie im sogenannten Internkode (gewöhnlich einem Binärkode) der Maschine und speichert sie im Speicher.

Der Speicher - das Gedächtnis der Maschine - ist in einzelne Zellen eingeteilt, die je ein Kodewort des Internkodes der Maschine, ein sogenanntes Maschinenwort aufnehmen können. Damit man ein gespeichertes Wort wiederauffinden kann, besitzt jede Zelle eine Nummer, die "Adresse".

Beim Eingehen der Programme und Zahlen wird genau festgelegt, in welche Zellen die diesen Daten entsprechenden Kodewörter eingespeichert werden, unter welcher Adresse man sie also aus dem Speicher wieder abrufen kann.

Das Rechenwerk nimmt die Umformungen mit den in seinen Registern stehenden Kodewörtern vor, die ihm das Steuerwerk durch seine Steuersignale befiehlt. Das Steuerwerk ist die zentrale Einheit der Maschine, die den ganzen Arbeitsablauf gemäß dem eingegebenen Programm regelt.

Wie wir wissen, kann das Rechenwerk eigentlich nur logische Umformungen der Kodewörter durchführen. Deshalb sind - um die Programmierungsarbeit nicht unnötig zu komplizieren - Unterprogramme für die arithmetischen Operationen  $+$ ,  $-$ ,  $\cdot$ ,  $:$  (nicht selten auch solche für die Funktionen  $\sqrt{x}$ ,  $\log x$ ) in der Maschine gespeichert - meistens sind diese im Steuerwerk fest "verdrahtet".

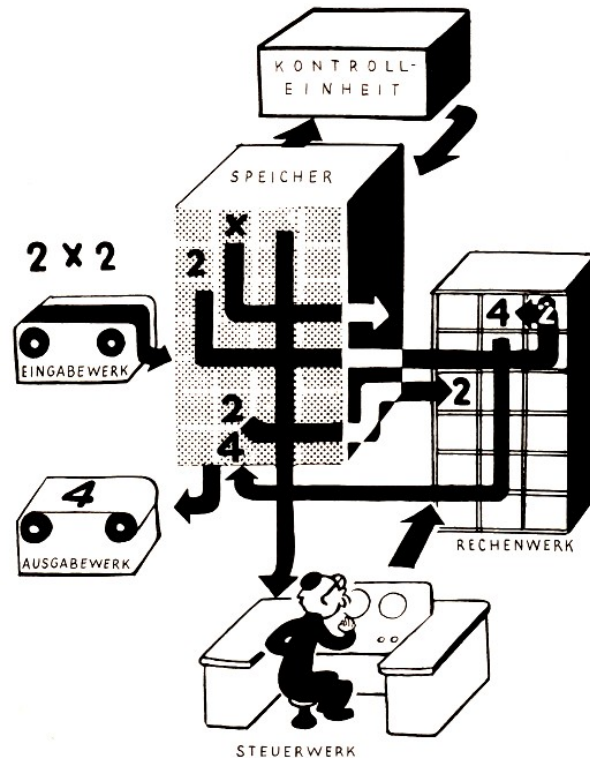


Bild 13.1.: Allgemeines Schema einer elektronischen Rechenmaschine.

Auf den Befehl "Multipliziere die in den beiden Registern des Rechenwerks gespeicherten Zahlen" sendet dann das Steuerwerk eine Serie von Befehlen an das Rechenwerk, die es veranlassen, die entsprechenden Umformungen der beiden Kodewörter in ein (dem Produkt entsprechendes) Kodewort vorzunehmen. Das Ausgabewerk schließlich wandelt die auszugebenden Daten aus dem Interncode der Maschine in den üblichen Buchstaben-Dezimalziffern-Kode um und gibt sie aus, z. B. in Form von gedrucktem Text oder Lochkarten.

Im Interncode der Maschine unterscheiden sich die Kodewörter von Zahlen nicht von den Kodewörtern, die Befehlen des Programms zugeordnet sind. Wenn die Maschine nach Eingabe der Daten (Programme und Zahlen) durch Druck auf den "Startknopf" in Betrieb gesetzt wird, dann steuert das Steuerwerk stets eine bestimmte Speicherzelle (meist die mit der Adresse - dezimalgeschrieben - 1) an, liest den Inhalt ab und interpretiert dieses Kodewort als Befehl. Je nach Konstruktion der Maschine ist in diesem Kodewort stets auch die Adresse der Zelle, in der der nächste Befehl steht (die Folgeadresse), niedergelegt. Oder die Maschine ist so gebaut, dass sie den nächsten Befehl der Zelle mit der Adresse 2 sucht. Das muss natürlich beim Eingeben des Programms - genauer bei der Verteilung der Befehle auf die einzelnen Speicherzellen - berücksichtigt werden.

Lautet der Befehl, den die Maschine in der Zelle 1 vorfindet, im Klartext: "Bringe den Inhalt der Zelle 15 in das erste Rechenwerkregister", dann führt die Maschine diesen Befehl aus, unabhängig davon, ob das Kodewort in der Speicherzelle 15 einen Befehl oder eine Zahl darstellt. Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit, mit Befehlen zu rechnen, d. h. einzelne

Befehle während der Arbeit der Maschine zu modifizieren. Dadurch wird die Programmierung der Maschine wesentlich vereinfacht und erleichtert.

Das Steuerwerk der Maschine ist mit einem Kontrollpult verbunden, auf dem Anzeigeeinrichtungen den Inhalt der wichtigsten Register, insbesondere des Rechenwerks, anzeigen.

Auf dem Kontrollpult befinden sich neben den Schaltern für "Start" und "Stop" solche, durch die einzelne Einheiten der Maschine - insbesondere das Steuerwerk - ausgeschaltet werden können. Mit anderen Schaltern kann dann eine Steuerung von Hand durch den bedienenden Menschen vorgenommen werden.

Das ist nötig, um Fehler, die z. B. durch ein fehlerhaftes Programm oder durch den Ausfall von Bauelementen der Maschine entstehen, auffinden zu können. Häufig ist das Steuerwerk gleich im Kontrollpult untergebracht.

Manche Maschinen besitzen außerdem noch eine Kontrolleinheit, die bestimmte Fehler feststellen und dem Kontrollpult melden kann. Dazu muss der Internkode jedoch redundant sein, was den Aufwand an Schaltelementen entsprechend erhöht.

Beim Entwurf eines Rechenautomaten muss man natürlich darauf achten, dass die Arbeitsgeschwindigkeit der einzelnen Baueinheiten möglichst gleich ist - eine Maschine ist so langsam wie ihr langsamstes Element. Es ist also sinnlos, ein elektronisches Rechenwerk mit einem mechanischen Steuerwerk zu koppeln.

Am ehesten kann bei den Eingabe- und Ausgabegeräten eine geringere Geschwindigkeit hingenommen werden. Aber auch das beschränkt die Verwendbarkeit des Automaten - er ist dann ökonomisch nur für solche Rechnungen einzusetzen, bei denen mit wenigen Daten komplizierte und langwierige Rechenprozesse durchgeführt werden müssen und nur wenige Ausgangsdaten entstehen.

Bei Rechnungen mit sehr vielen Eingangsgrößen, die alle nur einmal im Rechenprozess verwendet werden (wenn man z. B. das arithmetische Mittel von 100000 Zahlen berechnen muss), können die Eingabegrößen wegen des zu geringen Gedächtnisvolumens nicht gespeichert werden, sondern werden in dem Moment eingegeben, in dem sie die Maschine braucht. Bei einem relativ langsam arbeitenden Eingabewerk müsste dann das schnell arbeitende "Innere" des Automaten oft warten, bis das Eingabegerät die zur Fortsetzung des Rechenprozesses nötigen Daten geliefert hat, womit seine hohe Geschwindigkeit sinnlos wird. Entsprechend liegen die Verhältnisse auf der Ausgabeseite.

Da es noch nicht gelungen ist, Eingabegeräte zu entwickeln, deren Arbeitsgeschwindigkeit an die Arbeitsgeschwindigkeit des "Inneren" heranreicht, besitzen viele Maschinen mehrere parallel arbeitende Eingabegeräte.

Die beim Abarbeiten eines Programms in der Maschine ablaufenden Prozesse sind durch das Programm in bestimmten Grenzen vorgeschrieben, aber nicht starr determiniert - der Ablauf hängt auch von den eingegebenen Größen und den Rechenergebnissen ab. Es kommt durchaus vor, dass bei einigen Werten der Eingabegrößen viele Befehle überhaupt nicht gebraucht werden, andere Befehle dagegen sehr oft wiederholt ausgeführt werden.

Ob ein Befehl wirklich von der Maschine ausgeführt wird, kann man im allgemeinen nur sagen, wenn man die ganze Aufgabe, die die Maschine zu lösen hat, durchgerechnet hat, weil sich diese Tatsache erst im eigentlichen Rechenprozess herausstellt.

Viele Programme enthalten nämlich sogenannte "bedingte Sprungbefehle", das sind Befehle der Art: "Vergleiche die Zahl im ersten Rechenwerksregister mit der Zahl im zweiten Rechen-

werksregister. Ist der Absolutbetrag der Differenz größer als 2, dann ist als nächstes der Befehl in der Zelle 35 auszuführen; anderenfalls steht der nächste Befehl in der Zelle 131".

Welcher Befehl als nächster auszuführen ist, hängt also von Zahlen ab, die im allgemeinen erst während des Prozesses errechnet werden. Wir wollen nun die Arbeitsweise einer elektronischen Rechenanlage kennenlernen. Nehmen wir an, wir wollen einen Erdsatelliten auf eine Umlaufbahn bringen.

Auf der Grundlage vieler allgemeiner Überlegungen, Versuche und Untersuchungen haben Mathematiker und Ballistiker ein mathematisches Modell, d. h. Formeln, gefunden, nach denen die Ausgangsdaten (z. B. Masse, Form, Schubkraft der Rakete, Daten der Umlaufbahn usw.) in Befehle für die Steuerung der Rakete umgewandelt werden müssen. Davon ausgehend haben Programmierer ein Programm für die Arbeit der Maschine aufgestellt, d. h. eine Liste von einzelnen Befehlen.

Ist das Programm fertiggestellt, so schickt man es durch das Eingabewerk in den Speicher. Die Buchstaben und Dezimalzahlen werden dabei in Serien von elektrischen Impulsen verwandelt und diese durch die Zustände der Bauelemente des Speichers festgehalten - das Programm ist im Gedächtnis niedergelegt. Des weiteren wird eine Liste mit den Anfangswerten eingegeben, die Zahlen werden im Internkode der Maschine dargestellt und auf noch freie Speicherzellen verteilt.

Wenn wir nun die Verkleidung des Speichers der Anlage abnehmen, so können wir feststellen, dass sich außer den Zuständen der Speicherelemente nichts geändert hat.

Die Maschine ist bereit zum Rechnen, die gedachte Rakete ist bereit zum Start. Ein Druck auf die Starttaste, der Prozess beginnt. Das Steuerwerk liest den Inhalt der Zelle 1 ab, interpretiert das Kodewort als Befehl, gibt entsprechende Serien von Befehlen an den Speicher und das Rechenwerk, die den Transport der umzuformenden Kodewörter in die Register des Rechenwerkes und ihre Umarbeitung veranlassen. Das Ergebnis wird in die im Programm vorbestimmte Zelle transportiert und dort gespeichert.

Danach sucht das Steuerwerk den nächsten Befehl. Eventuell muss es dazu vorher einen Vergleich durchführen, d. h. zwei Zahlen in das Rechenwerk transportieren, ihre Differenz berechnen lassen usw.

Das alles geht so schnell, dass es unmöglich ist, diesen Vorgang sichtbar zu machen: Die modernen elektronischen Rechenmaschinen führen Zehntausende und einige sogar Hunderttausende Operationen in der Sekunde aus.

Die Starttaste ist gedrückt. Mit unvorstellbarer Geschwindigkeit werden innerhalb der Maschine Impulse hin und her gejagt, wechseln die Bauelemente ihre Zustände, während der bedienende Mathematiker am Pult sitzt und ruhig auf die Uhr schaut. Die Rakete fliegt.

In irgendeinem nicht wahrnehmbaren Moment greift die Kontrolleinheit in das Geschehen ein und unterbricht die Arbeit des Steuerwerks. "Wiederhole die Ausführung der letzten hundert Befehle, es liegt ein Fehler vor", signalisiert die Kontrolleinheit. Und wieder werden Impulse hin und her gejagt, wieder werden vom Gedächtnis Impulsfolgen, die elektrische Realisierung der Kodewörter, gespeichert bzw. abgegeben.

Ständig werden die Parameter der Raketenflugbahn von den Messstationen an die Eingabe geliefert, von der Maschine mit den errechneten Parametern verglichen, Steuersignale an die Rakete abgegeben, die Wirkung dieser Signale kontrolliert usw. Plötzlich leuchtet ein Lämpchen am Steuerpult auf. Die Rakete ist ausgebrannt, der Satellit abgestoßen.



Die Maschine berechnet nun aus den Messergebnissen der Bodenstationen die Parameter der Satellitenbahn und vergleicht sie mit den vorbestimmten Daten. Dann gibt die Maschine diese Parameter und ihre Rechenergebnisse (einschließlich der Zwischenergebnisse) über ein zweites Ausgabegerät (das erste war ja zur Übermittlung der Steuersignale an die Rakete bestimmt), z. B. einen Fernschreiber, aus. Auf einem Papierstreifen erscheinen lange Reihen von Buchstabenkombinationen und Dezimalzahlen.

Man kann sich schwer eine Schöpfung des menschlichen Geistes und Fleißes vorstellen, die imposanter ist als eine elektronische Rechenmaschine - das gigantische handelnde Modell all dessen, was der Berechnung zugänglich ist, und folglich all dessen, was wir in der Welt hinreichend gut kennen.

Im Prinzip kann man eine elektronische Rechenmaschine "vollelektronisch", d. h. vollkommen aus elektronischen Bauelementen, z. B. aus elektronenröhrenbestückten Triggern und eben solchen logischen Bausteinen aufbauen.

Die schon erwähnte Maschine "ENIAC" war so konstruiert.

Moderne Rechenautomaten operieren jedoch mit Zehntausenden von Zahlen und Tausenden von Befehlen. Sie müssen mehrere Millionen Gedächtniselemente haben (die ENIAC besaß nur 200). Eine solche Maschine enthielte so viele Elektronenröhren, dass man sie nicht in einem Saal unterbringen könnte. Für die Heizung der Röhren benötigte man die Kapazität eines großen Elektrizitätswerkes (schon die ENIAC verbrauchte 174 kW!) und zur Kühlung ganze Wasserfälle. Fast jede Sekunde müsste man eine solche Maschine anhalten, um eine durchgebrannte Röhre auszuwechseln.

Es gibt zwei prinzipiell verschiedene Möglichkeiten zur Konstruktion großer elektronischer Rechenmaschinen.

Erstens kann man die Spezialisierung der einzelnen Baueinheiten der Maschine fortsetzen. Dabei teilt man den Speicher der Maschine in einzelne Abschnitte mit verschiedenen Zugriffszeiten ein. Als Zugriffszeit bezeichnet man die Zeit, die vom Aufrufen einer Speicherzelle durch das Steuerwerk bis zur Abgabe des gespeicherten Kodewortes vergeht. Realisiert man den Speicher nur mit Triggern, so ist die Zugriffszeit gleich Null.

Anders liegen die Dinge, wenn man andere Typen von Speichern, wie sie unten beschrieben werden, verwendet. Diese Typen gleichen den Nachteil der größeren Zugriffszeit durch den Vorteil aus, dass sie bei geringerem Aufwand an Material und Energie größere Informationsmengen aufnehmen können.

Der Aufteilung des Speichers in mehrere Teile mit verschiedenen Zugriffszeiten und Kapazitäten (die Speicherkapazität ist die maximal speicherbare Informationsmenge - gemessen in Bit) liegt die Tatsache zugrunde, dass Rechenwerk und Steuerwerk der Maschine bei jedem Rechenschritt nur einige wenige Zelleninhalte (Kodewörter) ablesen müssen.

Schafft man diese Kodewörter "rechtzeitig" aus einem langsamen Teil des Speichers in den schnellsten (den sogenannten Schnellspeicher), dann können Rechenwerk und Steuerwerk ohne Wartezeit aus dem Schnellspeicher, der vielfach mit Triggern realisiert wird, mit den ihnen zukommenden Kodewörtern bedient werden.

Während das Steuerwerk den Befehl ausführen lässt und das Rechenwerk die Kodewörter umformt, müssen dann die im nächsten Schritt gebrauchten Kodewörter, der nächste Befehl und die vom nächsten Befehl betroffenen Zelleninhalte in den Schnellspeicher geholt werden. In diesem Fall arbeitet die Maschine ohne Wartezeiten, als ob der gesamte Speicher aus Triggern aufgebaut wäre.

In den langsamen Teilen des Speichers kann man auf die für Trigger charakteristische Arbeitsgeschwindigkeit verzichten und dafür eine konstruktive Lösung wählen, die Raum und Energie spart. Allerdings wird dadurch die Programmierung der Maschine schwieriger, denn das Umspeichern der Informationen aus den langsamen Teilen des Gedächtnisses in den Schnellspeicher muss im Programm vorgesehen werden.

Zweitens kann man nach Konstruktionen für die Bauelemente von Rechenautomaten suchen, die weit kleiner sind und einen geringeren Energieverbrauch haben als die elektronenröhrenbestückten Schaltungen, die aber die gleichen Eigenschaften besitzen wie diese und sie sogar in Bezug auf Geschwindigkeit und Einfachheit der Herstellung übertreffen. Dann könnte man die gesamte Maschine weiterhin aus gleichförmigen bistabilen Bauelementen aufbauen.

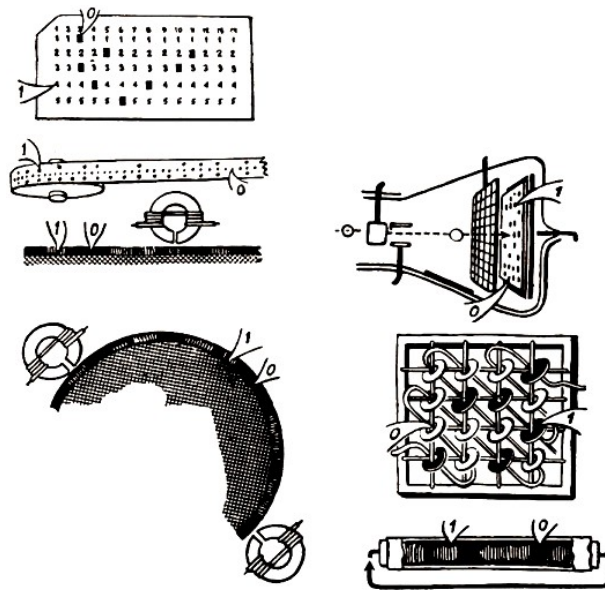


Bild 13.2.: In der Abbildung sind verschiedene Arten von Speicherelementen, die in Hochgeschwindigkeits-Rechenautomaten verwendet werden, schematisch dargestellt: (von oben nach unten, links) Lochkarte, Lochstreifen, Magnetband, Magnettrommel, (rechts) elektrostatische Röhre, Ferritkernmatrix und Quecksilberlaufzeitglied.

In der Entwicklung der elektronischen Rechentechnik triumphierte zunächst das erste Prinzip. Während die "ENIAC" 18000 Elektronenröhren enthielt, waren es bei der 1952 fertiggestellten "EDVAC" nur 3500 Röhren. In vielen modernen Maschinen behält man Triggerschaltungen nur für die Register des Rechenwerks bei.

Neben Triggerketten verwendet man als Schnellspeicherzellen vielfach geschlossene Schaltkreise, die eine Verzögerungsstrecke enthalten. In diesen Kreisen zirkulieren die Impulse dann solange, bis sie gebraucht werden, d. h. das von ihnen realisierte Kodewort abgerufen wird. Als Verzögerungsstrecke dienen dabei z. B. mit Quecksilber gefüllte Metallröhrchen, die auf beiden Seiten von Quarzkristallen abgeschlossen werden (Quecksilberlaufzeitglieder). Unter der Einwirkung der Signalimpulse schwingt der Eingangskristall und erzeugt im Quecksilber Wellen, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Impulsen in elektrischen Leitern klein ist.

Die Signale brauchen eine messbare Zeit, bis sie in derselben Reihenfolge auf den Ausgangskristall treffen, von diesem wieder in elektrische Impulse verwandelt werden und über eine elektronische Anlage, die eventuelle Verzerrungen beseitigt, und eine Schaltung, durch die Impulsfolgen aus dem Kreis ausgekoppelt bzw. in den Kreis hineingespeichert werden, wieder

zum Eingangskristall zurückkehren.

Vollkommen analog arbeiten magnetostruktive Verzögerungsstrecken. Sie bestehen aus Metallstäben, um deren Enden Spulen angebracht sind. Die elektromagnetischen Schwingungen, die beim Durchgang von Impulsen durch die Eingangsspule entstehen, rufen mechanische Schwingungen des Stabes hervor, die von der Ausgangsspule wieder in elektromagnetische Schwingungen und Impulse verwandelt werden.

Da ein Kodewort nur in dem Moment aus einem solchen Schaltkreis ausgekoppelt werden kann, in dem sein Anfang die Verzögerungsstrecke verlässt, ist die durchschnittliche Zugriffszeit einer solchen Speichereinrichtung etwa gleich der halben Verzögerungszeit, d. h. der Zeit, die das Kodewort zum Durchlaufen der Verzögerungsstrecke benötigt.

Einen Speicher, der durch Verzögerungsstrecken realisiert ist, bezeichnet man als dynamisch, da sich die Kodewörter hier in einer ständigen Bewegung befinden.

Andere Arten von Schnellspeichern arbeiten mit Abkömmlingen der Kathodenstrahloszillographenröhre. Bei diesen Speicherröhren ist der Bildschirm durch eine Platte mit einer großen Anzahl von Kondensatoren ersetzt, die alle eine Elektrode gemeinsam haben. Diese Elektrode ist dem Elektronenstrahl abgekehrt.

Der modulierte Elektronenstrahl lädt die anderen Elektroden der Kondensatoren mehr oder weniger auf (je nachdem, ob er eine große oder eine kleine Anzahl von Elektronen auf die Platte schiebt). In den Kondensatoren bleibt die Ladung für eine gewisse Zeit erhalten, danach muss sie erneuert werden.

Auch diese Röhren realisieren also ein dynamisches Gedächtnis. Das Ablesen des Speichers wird dadurch ermöglicht, dass in den Zuleitungen zur Katode der Röhre und der gemeinsamen Elektrode ein Impuls (ein relativ starker Stromstoß) entsteht, wenn der Elektronenstrahl einen gänzlich ungeladenen Kondensator trifft, und kein Impuls, wenn der Elektronenstrahl einen geladenen Kondensator trifft.

Ein dynamischer Speicher ist stets instabil; wird nämlich die Stromversorgung durch einen Schaden unterbrochen, so führt das zum Verschwinden der gespeicherten Kodewörter.

Um den Energie- und Materialaufwand, der zur ständigen Erneuerung der in einem dynamischen Gedächtnis gespeicherten Information gebraucht wird, einzusparen, suchte man nach Bauelementen für ein statisches Gedächtnis, dessen Zugriffszeit möglichst klein ist und das mit relativ billigen Bauelementen (verglichen mit den Triggerspeichern) zu realisieren ist.

Solche Bauelemente sind die Ferritkerne. Das sind sehr<sup>54</sup> kleine Ringe, die aus einem Keramik-Eisendioxid-Pulver gesintert werden.

Bei der Konstruktion eines Speichers werden solche Ferritkerne in einer Matrix angeordnet, ähnlich wie die Dioden in einer Diodenmatrix. Eine Ferritkernmatrix ist ein Gitter von einander kreuzenden Drähten, bei denen in den Kreuzungspunkten aber keine leitende Verbindung zwischen diesen Drähten besteht. In den Kreuzungspunkten sind die (ringförmigen) Ferritkerne angeordnet.

Ferrit ist ein Material, das sich leicht magnetisieren lässt und ein extremales Magnetisierungsverhalten zeigt. Das heißt, dass ein einmal bis zur magnetischen Sättigung magnetisierter Kern sich nicht wieder entmagnetisieren lässt.

Schickt man durch einen Draht, auf dem der Kern steckt, einen schwachen Strom, der ein Magnetfeld induziert, das dem Feld im Kern entgegengerichtet ist, so ändert das nichts am

---

<sup>54</sup>Kleinste Abmessungen: Innendurchmesser 0,33 mm, Außendurchmesser 0,53 mm.

Magnetisierungszustand des Kerns. Bei einer allmählichen Verstärkung dieses Stroms wird aber schließlich ein Punkt erreicht, in dem der Kern ummagnetisiert wird, d. h., er geht wieder in einen Zustand magnetischer Sättigung über, der sich von dem vorigen Zustand nur dadurch unterscheidet, dass das Magnetfeld im Kern jetzt die entgegengesetzte Richtung besitzt.

Den beiden möglichen Richtungen des Magnetfeldes innerhalb des Kerns, d. h. seinen beiden Magnetisierungszuständen, ordnet man die beiden Zeichen des Binärkodes der Maschine zu. Um einen Kern aus einem Magnetisierungszustand in den anderen zu versetzen, muss in dem Kern ein entsprechend-gerichtetes Magnetfeld hinreichender Stärke induziert werden. Durch den horizontalen und den vertikalen Draht schickt man gleichzeitig einen Strom, dessen Stärke und Richtung so bemessen sind, dass von diesen Drähten je die Hälfte der zur Ummagnetisierung erforderlichen Feldstärke induziert wird.

Auf diese Weise wird allein bei dem Kern, der im Kreuzungspunkt beider Drähte sitzt, die induzierte Feldstärke zur Ummagnetisierung groß genug. (In den anderen Kernen wird nur die halbe Feldstärke induziert.) Ein dritter Draht, der diagonal durch alle Kerne führt, dient zum Ablesen der gespeicherten Kodewörter.

Angenommen, wir wollen das in der ersten Zeile der Matrix gespeicherte Kodewort, das heißt die Magnetisierungszustände der Kerne in dieser Zeile, ablesen.

Wir lassen hierzu durch den ersten horizontalen Draht Strom in der Richtung fließen, bei der die Kerne in den Zustand 0 ummagnetisiert werden können, dessen Stärke aber nur die Hälfte der zu dieser Ummagnetisierung erforderlichen Stromstärke ausmacht (das heißt, die induzierte Feldstärke ist nur halb so groß wie erforderlich).

Durch die vertikalen Drähte schickt man nacheinander ebensolche Ströme. Dadurch werden nacheinander alle Kerne der ersten Zeile in den Zustand 0 versetzt. Wenn ein Kern dieser Zeile nicht schon vorher im Zustand 0 war (also im Zustand 1 war), dann entsteht bei seiner Ummagnetisierung im diagonalen sogenannten Lesedraht ein Impuls.

Beim sukzessiven Versetzen der Kerne in der ersten Zeile in den Zustand 0 entsteht also im Lesedraht eine Folge von "Impuls - kein Impuls", die dem abgelesenen Kodewort entspricht. Beim Ablesen wird also die gelesene Speicherzelle gleichzeitig gelöscht, ein Nachteil, der bei besonders geformten Ferritkernen nicht auftritt.

Die Ferritkernmatrizen werden als Grundlage für stabile und hinreichend schnelle Speicher viel verwendet, u. a. auch in dem in der DDR entwickelten Rechenautomaten ZRA 1.

In dem Teil des Speichers, bei dem die Arbeitsgeschwindigkeit geringere Bedeutung hat als die Kompaktheit und Stabilität, verwendet man vielfach Magnettrommeln und Bänder, die gewöhnlichen Tonbändern ähnlich sind. Der Unterschied besteht nur in der Formgebung. Die Trommel ist ein kurzes, breites, geschlossenes Band mit einer großen Anzahl von Spuren für die Aufzeichnung der Kodewörter.

Ihre Anzahl ist gewöhnlich gleich der Länge der Maschinenwörter, d. h. der Kodewörter des Internkodes. Jede Spur besitzt einen eigenen Wiedergabe- und Aufnahmekopf.

Schließlich verwendet man auch teilweise noch Lochkarten und Lochstreifen zur Informationsspeicherung. Dieser Teil des Speichers ist naturgemäß der langsamste. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass in eine Lochkarte bzw. eine Stelle eines Lochstreifens nur einmal ein Kodewort eingetragen werden kann. Diese Speicher eignen sich also nur zur Aufnahme fester Werte, z. B. zur Speicherung der Werte der wichtigsten transzendenten Funktionen ( $\sin$ ,  $\tan$ ,  $\log$ , . . .), d. h. als eine Art Logarithmentafel, und zur Aufnahme bestimmter Teile des Programms, die im Laufe des Rechenprozesses nicht (durch Rechnen mit Befehlen) verändert werden.

Da die Lochkarten und Lochstreifen viel Raum einnehmen, untersucht man heute die Möglichkeit, winzige Fotografien als Grundlage eines festen Gedächtnisses zu benutzen (fotografische Speicher).

Durch diese Komplizierung der Maschinenstruktur gelingt es, gute Arbeitseigenschaften (Geschwindigkeit, Genauigkeit, Gedächtniskapazität) zu erreichen, ohne die Grenzen des technisch Möglichen und wirtschaftlich Zweckmäßigen zu überschreiten.

Die Schaffung einer elektronischen Rechenmaschine ist ein bedeutendes Ereignis im wissenschaftlichen Leben jedes Landes.

Der erste in der DDR entwickelte Rechenautomat war die Relaismaschine OPREMA, die unter der Leitung von W. Kämmerer und H. Kortum beim VEB Carl Zeiss Jena für den Eigenbedarf entwickelt, Ende 1953 fertiggestellt und Anfang 1954 voll in Betrieb genommen wurde.

Am Institut für Maschinelle Rechentechnik der Technischen Universität Dresden wurde der erste elektronische Rechenautomat der DDR, der "D 1", von N. J. Lehmann entwickelt und im Jahre 1957 fertiggestellt. In den folgenden Jahren wurden weitere Automaten entworfen und gebaut. Im Jahre 1964 wurde der "D 4a", ein elektronischer Kleinstrechner auf Transistorbasis, vorgestellt.

Dieser Automat besitzt die Abmessungen eines normalen Fernsehempfängers! Beim VEB Carl Zeiss Jena wurde der obenerwähnte Rechenautomat ZRA 1 entwickelt und ab 1962 in Serie gebaut. Dieser Automat gehört zur Standardausrüstung der Rechenzentren in der DDR. An neueren Entwicklungen in der DDR sind der "robotron 100" und der "robotron 300" zu nennen.

Alle diese Automaten sind unseren gegenwärtigen Bedürfnissen entsprechend im Vergleich zu den auf der Welt bereits erreichten als (die Speicherkapazität betreffend) kleine Maschinen mit relativ geringer Arbeitsgeschwindigkeit zu bezeichnen.

Große Hochgeschwindigkeitsrechenautomaten werden vor allem in den USA und in der Sowjetunion entwickelt und produziert.

Es erhebt sich die Frage: Ist nicht die Produktivität der Maschine im wesentlichen eine scheinbare?

Jede Operation der Maschine muss doch vorher vom Menschen ausgedacht, programmiert und geprüft werden, und das kostet viel Zeit und Arbeit.

Natürlich nicht. Die Iterationsmethode bleibt ja die Grundlage der Lösung von Aufgaben in der Maschine. Bei der Mehrzahl der praktisch verwendeten Rechenmethoden findet man im Rechenprozess Zyklen, die sich vielfach wiederholen.

Beim Programmieren braucht man diese Zyklen nur einmal in das Programm aufzunehmen, bei einer Wiederholung wird einfach auf die entsprechende Etappe des Programms zurückgeschaltet. Bei der Einarbeitung auf eine Maschine sammelt der Programmierer einen großen Vorrat von ausgearbeiteten Programmen, es entsteht eine ganze Bibliothek für alle typischen Rechnungen, und diese Programme können immer wieder verwendet werden. -

Außerdem kann ein Teil der Programmierarbeit von der Maschine selbst ausgeführt werden. Diese Arbeit teilt sich in folgende Etappen. Zunächst muss ein mathematisches Verfahren ausgewählt werden, nach dem die gestellte Aufgabe von der Maschine gelöst werden kann. Dann wird dieses Rechenverfahren in einzelne Abschnitte aufgeteilt, wobei insbesondere die Zyklen im Rechengang hervorgehoben werden - das Ergebnis ist ein sogenanntes Fluss- oder Strukturdiagramm.

Nach diesem Flussdiagramm wird in der nächsten Etappe ein Pseudoprogramm ausgearbeitet,

bei dem die Zahlen und Befehle noch im Klartext formuliert sind, wobei allerdings, zahlreiche Abkürzungen verwendet werden.

Die Tendenz geht dahin, zur Formulierung des Pseudoprogramms eine (für alle Rechenmaschinen einheitliche) - der arithmetischen ähnliche - Formelsprache zu verwenden und den Rest der Arbeit, nämlich das Übersetzen des Pseudoprogramms in die Maschinensprache, d. h. die Herstellung des eigentlichen Maschinenprogramms, ferner die Prüfung dieses Programms, durch Automaten (eventuell die verwendete Maschine selbst) ausführen zu lassen. Ein Beispiel für eine solche "Programmierungssprache" ist das vielfach verwendete ALGOL 60.<sup>55</sup>

Diese Überlegungen bilden die Grundlage von Theorie und Praxis der automatischen Programmierung von Rechenmaschinen.

Hierbei stehen nicht mehr die rechnerischen, sondern die logischen Fähigkeiten der Maschine im Vordergrund.

Die logischen Fähigkeiten der elektronischen Rechenautomaten wurden ursprünglich nicht genügend gewürdigt; man sah diese Maschinen hauptsächlich als Arbeitsinstrument der Rechner an. Aber gibt es denn so viele Rechner und Rechenarbeit auf der Welt?

Sicher haben viele Leser dieses Buches in ihrem Leben noch nie auch nur einen einzigen Rechner getroffen, einen Menschen, der durchschnittlich sieben Stunden am Tage nur nach einem gestellten Programm rechnet, ohne in das Wesen dessen einzudringen, was er rechnet. Und wenn eine große elektronische Maschine 100000 Rechner ersetzt, ersetzen dann vielleicht zwei, drei Maschinen alle Rechner, so dass nichts mehr zu rechnen bleibt?

Diese Befürchtungen sind grundlos. In allen Zweigen von Wissenschaft und Technik besteht nämlich schon seit langem das Bedürfnis, sehr lange und sehr komplizierte Rechnungen durchzuführen. Bisher wurden häufig nur deshalb grobe Näherungsformeln benutzt oder die Rechnungen überhaupt nicht ausgeführt, weil es unmöglich war, die erforderliche Anzahl qualifizierter Rechner zu finden bzw. einzusetzen.

In der theoretischen Physik und insbesondere der Atomphysik wurden so komplizierte Gesetzmäßigkeiten festgestellt, dass ihre numerische Auswertung sogar mit Hilfe moderner elektronischer Rechenautomaten Jahre in Anspruch nimmt.

Umfangreiche Rechnungen sind auch in der Astronomie durchzuführen. Wenn aus Beobachtungen und den Gesetzen der Himmelsmechanik die Position von Himmelskörpern im Voraus berechnet werden soll. Im Jahre 1955 zum Beispiel wurde mit Hilfe von elektronischen Rechenmaschinen die Position des Planetoiden "Atalia" berechnet, den man schon 1903 entdeckt, aber bald wieder verloren hatte. Wie erwähnt, werden auch die Bahnen künstlicher Satelliten und kosmischer Raketen auf elektronischen Maschinen berechnet.

Die Geodäten, die sich mit der Vermessung der Erdoberfläche zur Herstellung von Karten beschäftigen, erfassen das ganze Land mit einem Netz von Dreiecken und tragen die Angaben über das Gelände in dieses Netz ein. Aber die Erde ist rund, und die Dreiecke sind daher keine ebenen, sondern sphärische Dreiecke.

Unmittelbare Messungen der Entfernungen im Gelände sind mitunter schwierig oder unmöglich. Die ganze Geodäsie gründet sich darauf, dass an einem geeigneten Ort eine Linie, die "Basis" des Netzes, mit großer Genauigkeit gemessen wird und dass im folgenden nur noch die Winkel von sphärischen Dreiecken gemessen werden. Die übrigen Angaben über das Netz muss man errechnen, und das ist eine große Arbeit.

---

<sup>55</sup>Bericht über die algorithmische Formelsprache ALGOL 60. Akademie-Verlag, Berlin 1962.

Die Kartographen haben Verfahren zur automatischen Herstellung von Karten nach Luftaufnahmen gefunden, die auf eine Umrechnung der Koordinaten aller auf den Aufnahmen sichtbaren Objekte hinauslaufen. Zu diesem Zweck werden ebenfalls Rechenautomaten verwendet. Es ist auch weithin bekannt, dass die Entwicklung neuer optischer Systeme, beispielsweise von Objektiven für Fotoapparate, Fernrohre und Mikroskope, einen großem Rechenaufwand erfordert.

Die Aerodynamik und die Hydrodynamik haben für die Berechnung der Wirkung von Gas- bzw. Flüssigkeitsströmungen auf verschieden geformte Gegenstände Verfahren ausgearbeitet, die gewöhnlich die numerische Lösung von Differentialgleichungen erfordern.

Auch die Kristallographen müssen bei der Klärung der Möglichkeiten für die dichteste "Packung" der Moleküle und Atome im Kristallgitter ziemlich lange und komplizierte Rechnungen durchführen. Bei einer Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen erhält man verschwommene Aufnahmen mit kleinen Flecken, die die Verteilung der Moleküle charakterisieren. Diese Aufnahmen werden mathematisch verarbeitet und liefern die Koordinaten aller Moleküle und schließlich die Strukturformeln der Stoffe.

Ein umfangreiches Anwendungsgebiet der Rechentechnik stellt die Wettervorhersage dar. Lange Zeit machten die Meteorologen Aufzeichnungen der atmosphärischen Erscheinungen an den verschiedensten Orten der Erde in der Hoffnung, sie irgendwann einmal für Prognosen verwenden zu können. Sie nahmen vereinfachend an, die Erde bilde mit ihrer Atmosphäre ein isoliertes System und die früher aufgezeichneten Wettersituationen würden sich für alle Zeiten periodisch wiederholen, wenn eines Tages auf der ganzen Erde Wetterverhältnisse eintreten würden, die schon einmal verlangen.

Praktisch trat das nicht ein, aber trotzdem gelingt es, das Wetter mit Hilfe gewöhnlicher Zähl- und Analysiermaschinen für kurze Zeit teilweise vorauszusagen.

Dazu wird der Kartenvorrat, in dem die beobachteten verschiedenen Wettersituationen gespeichert sind, durch eine Sortiermaschine geschickt, und dabei werden die Karten ausgewählt, auf denen eine Wettersituation eingetragen ist, die der des laufenden Zeitabschnitts am ähnlichsten ist. Anschließend "sieht die Maschine nach", welches Wetter sich früher aus diesen Situationen entwickelt hat, und stellt dementsprechend eine Prognose für den folgenden Zeitabschnitt.

Im Jahre 1922 leitete der Engländer Richardson die "Gleichung der Wirbelkonvektion" her, nach der die Änderung der Luftdruckverteilung bei einer gegebenen Situation berechnet werden kann. Nach dieser Gleichung berechnete Richardson eine "Voraussage" des Wetters im Gebiet Nürnberg-Augsburg für den 20. Mai 1910, die jedoch nur wenig mit der tatsächlichen Wetterlage 12 Jahre zuvor übereinstimmte.

Richardson schlug vor, ein "Institut zur Wettervorausberechnung" zu gründen, in dem 64000 Rechner arbeiten sollten. Das war völlig utopisch.

Der sowjetische Meteorologe I. Kibel vereinfachte die Richardsonsche Gleichung wesentlich und organisierte im Jahre 1940 die erste praktische Wettervorausberechnung. Elektronische Rechenmaschinen, z. B. die sowjetische Maschine "Pogoda", ermöglichen es, bei der Vorausberechnung des Wetters weit mehr Faktoren zu berücksichtigen, als das früher möglich war. Dabei wurden schon bedeutende Erfolge erzielt.

So wurde 1950 mit Hilfe der Maschine "Maniac" der Harvard-Universität in Princeton (USA) ein großer Sturm 12 Stunden vor seinem Auftreten vorausgesagt.

Karl Marx hat einmal gesagt, dass eine neue Produktion nicht nur einen Verbrauchsgegen-

stand, sondern auch den Verbraucher erzeugt. Viele Gebiete der Technik, in denen früher keine eingehenden Rechnungen durchgeführt wurden, wandten sich nun den Rechenmaschinen zu. Anstatt Zeit, Arbeit und Material auf die Herstellung und Erprobung von Modellen und Versuchsmustern, z. B. von Atomreaktoren, Düsenantrieben von Raketen und Flugzeugen, Turbinen mit hoher Drehzahl, automatischen Reglern mit Rückkopplungen usw. zu verwenden, konnte man einfach verschiedene Parameter der zu untersuchenden Objekte vorgehen und dann nach bekannten Formeln die Ergebnisse der mathematisierten Experimente berechnen. Früher wurden solche Versuche mit Analogiemaschinen durchgeführt. Diese erwiesen sich jedoch als ungeeignet: Die Maschinen mussten für jede Aufgabe neu entwickelt oder entsprechend umgebaut werden, die Ergebnisse aber waren nicht genügend zuverlässig. Die große Genauigkeit, Schnelligkeit und Universalität der elektronischen Rechenautomaten leisten auch hier gute Dienste.

Die Ersetzung von realen Maschinen, z. B. von Flugzeugen, durch Modelle in Form von Rechengegeräten erwies sich für die Ausbildung von Fliegern und die Erprobung von Autopiloten als sehr zweckmäßig. Der zukünftige Flieger sitzt in einer nach allen Seiten geschlossenen Kabine; er sieht nur die Geräte und hört den Motorenlärm.

Von Zeit zu Zeit entsteht zufällig irgendeine Unregelmäßigkeit des "Fluges", und der Pilot muss diese Abweichung vom normalen Regime durch Folgen von Befehlen, die er scheinbar dem Flugzeug, in Wirklichkeit dem Rechenautomaten übermittelt, ausgleichen. Wird der Flieger durch einen Autopiloten ersetzt, so kontrolliert und erprobt eine Maschine die andere, und der Mensch beobachtet als Unbeteiligter, was dabei herauskommt.

Ein weites Anwendungsgebiet der Rechentechnik stellen Planung und Leitung von Volkswirtschaft, Industrie und Handel dar. Die Angaben, die man durch die Bearbeitung von Zählungen materieller Werte, bei Volkszählungen und aus Berichten über Angebot und Nachfrage erhält, dienten den leitenden Organen früher nur als Ausgangsmaterial für ihre Analyse und die auf dieser Analyse basierenden Entscheidungen für die Zukunft.

Jetzt liefern Maschinen gleich die Analysen und geben konkrete Empfehlungen, was wann, wo, wie und von wem getan werden sollte. Die maschinelle Analyse erwies sich als hinreichend leistungsfähiges und zuverlässiges Mittel zur Berechnung der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Preisen und Tarifen auf den Gebieten der Rohstoffherzeugung, des Transports und des Handels.

So wurde am Institut für elektronische Steuerungsmaschinen (Moskau) 1956 ein Programm für die Maschine M 2 ausgearbeitet, das der Berechnung der Werte und Preise der Produktion in miteinander verflochtenen Zweigen der Volkswirtschaft diene. Im Jahre 1960 erprobte man hier ein kompliziertes Programm zur Ausarbeitung eines solchen Plans für den Transport von Kohle von 30 Lagerstätten an alle volkseigenen Betriebe, bei dem die Transportkosten minimal werden. Ein anderes Programm war dazu bestimmt, die zweckmäßigste Form der Energieversorgung zu bestimmen.

Das gesellschaftliche Eigentum an Produktionsmitteln und die sozialistische Planwirtschaft ermöglichen es, in allen Zweigen der Volkswirtschaft weitgehend eine automatische Steuerung und Kontrolle einzuführen. Zweifellos werden bald alle Wirtschaftsorgane, alle Abteilungen der Staatlichen Plankommission und alle Zweigkomitees über eigene elektronische Rechenmaschinen verfügen.

Die weiteste Verbreitung haben die elektronischen Rechenautomaten gegenwärtig in den USA. Im Jahre 1963 arbeiteten in den USA bereits 20000 elektronische Rechanlagen, 7000 weitere



wurden in demselben Jahr in Auftrag gegeben. Insgesamt 500 verschiedene Verwendungszwecke für diese Maschinen wurden gezählt.

Bei der Firma "General Electric" führt seit dem Jahre 1954 ein Rechenautomat die gesamte Lohnbuchhaltung für 10000 Arbeiter und Angestellte. Die Maschine berechnet den Bruttolohn einschließlich eventueller Zuschläge, setzt die Steuern und sonstigen Abzüge ab und schreibt schließlich einen Scheck über den Nettolohn aus. Entsprechende Aufgaben übernehmen Maschinen auch im Bankwesen - das Überprüfen der Kontenstände, Ausschreiben von Kontoauszügen, Ausführung von Überweisungen und Daueraufträgen usw.

Beim Erdölkonzern "Texaco" gibt ein Rechenautomat täglich Auskünfte über den profitabelsten Produktionsausstoß hinsichtlich Menge und Sortiment. Um eine richtige Antwort geben zu können, analysiert die Maschine ständig die bei ihr einlaufenden Nachrichten über die Marktlage (Angebot, Nachfrage und Preise für Benzin, Öl, Petroleum und andere Erzeugnisse), ferner Informationen über die Lagerbestände und Produktionsergebnisse bei den verschiedenen abzusetzenden Produkten.

Die Lösung komplizierter wirtschaftlicher Probleme durch elektronische Rechenmaschinen wurde erst möglich, nachdem eine mathematische Theorie - ein mathematisches Modell - dieser Vorgänge, die Theorie des ökonomischen Verhaltens, geschaffen war.

Diese Theorie sucht nach Methoden zur Extrapolation des Verhaltens von miteinander gekoppelten dynamischen Prozessen, die durch bestimmte Parameter beschrieben werden. Dabei wird angenommen, dass diese Prozesse wenigstens zu einem Teil steuerbar sind, d. h., dass man so auf sie einwirken kann, dass eine bestimmte Gruppe von Parametern "günstige", d. h. bestimmten Interessen entsprechende Werte annimmt oder sich in günstiger Richtung ändert. Das Ziel selbst muss quantitativ hinreichend vollständig formuliert sein. Die Theorie des ökonomischen Verhaltens ist mit der Spieltheorie eng verwandt und kann dieser untergeordnet werden.

Ein Spezialgebiet der Theorie des ökonomischen Verhaltens bildet die Bedienungstheorie, die mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Hilfsmitteln die Arbeitsweise von Systemen untersucht, die - wie z.B. ein Telefonnetz - in relativ zufälliger Weise beansprucht werden.

Ein solches System kann, je nach den technischen Möglichkeiten, über die es verfügt, einer bestimmten Höchstzahl zufällig gleichzeitig eintreffender Anforderungen genügen, darüber hinaus eintreffende Anforderungen werden abgelehnt oder müssen sich in eine "Warteschlange" einreihen.

Das Handelsnetz, der Transport, die Dienstleistungsbetriebe - Bäder, Frisöre, Fotoateliers, Handwerker, Sparkassen, Bibliotheken, sogar Kinos, Theater und Museen - sind, wenn man ihre Arbeit mathematisch beschreibt, einer Telefonzentrale sehr ähnlich. Sie können nicht im voraus wissen, wann es Ihnen in den Kopf kommt, Ihren Freund anzurufen, einen Teil Ihres Geldes abzuheben oder Ihre Familie auf einem Gruppenbild zu verewigen.

Wenn diese zufälligen Ereignisse in einer großen Anzahl auftreten - einen Massenprozess bilden -, gleicht sich aber das Spiel der Laune und des Zufalls, das die einzelnen Kunden beherrscht, aus, und in den Vordergrund treten allgemeine Tendenzen in der Nachfrage nach Waren, Dienstleistungen, Büchern oder Auftritten von populären Schauspielern.

Es ist notwendig, diese Tendenzen richtig einzuschätzen, um Absagen, Schlangen oder Spekulation und Stillstandszeiten zu vermeiden und damit Zeit, Material und Energie einzusparen. In optimaler Weise kann das nur mit Hilfe der Mathematik und der Rechentechnik geschehen.

Bei dem angeführten wirtschaftlichen Problem kann man - infolge der Wechselwirkungen und Verflechtungen zwischen einzelnen Parametern des untersuchten ökonomischen Systems - die Gruppe von Parametern, für die man optimale (minimale oder maximale) Werte erreichen möchte (z. B. Produktivität, Produktionsausstoß und -kosten, Energie- und Materialverbrauch usw.), nicht ändern, ohne dass sich nahezu alle Parameter des Systems ändern.

Eine günstige Änderung eines Parameters führt nicht selten zu einer ungünstigen Änderung einer Reihe anderer wichtiger Parameter. So kann man z. B. Produktionskosten, Energie- und Materialverbrauch sehr leicht minimal machen, indem man die Produktion einstellt. Dabei nimmt aber der Produktionsausstoß seinen ungünstigsten Wert, nämlich, den Wert Null, an.

Um das gestellte Ziel zu erreichen, wendet man vielfach Methoden der sogenannten linearen Optimierung (auch lineare Programmierung genannt) an, bei denen die Abhängigkeiten zwischen den sich ändernden Parametern etwas vereinfacht modelliert werden. In den letzten Jahren sind jedoch auch Methoden zur dynamischen Optimierung ausgearbeitet worden, bei denen diese Abhängigkeiten, soweit sie erforscht sind, in vollem Umfang berücksichtigt werden.

Die ständig wachsende Menge der wissenschaftlich-technischen Information, die die Menschheit erarbeitet, macht heute die Automatisierung der Dokumentation, d. h. der maschinellen Referatherstellung, Katalogisierung und Auffindung von Informationen, sehr dringlich. Man hat zum Beispiel berechnet, dass die Länge der gefüllten Bücherregale in der Leninbibliothek der UdSSR jährlich um 10 km zunimmt.

Man schätzt, dass auf der Welt bereits 100 Millionen Buchtitel existieren. Um alle diese Bücher durchzulesen, brauchte ein Mensch zweitausend Lebensalter.

In erster Linie muss man also systematisch und fachlich geordnete Bücher- und Zeitschriftenkataloge automatisieren und insbesondere die Arbeit ihrer Zusammenstellung. Ferner muss man Maschinen bauen oder programmieren, die Ingenieuren, Wissenschaftlern, Wirtschaftlern, Ärzten und anderen Fachleuten helfen, in kürzester Frist gewünschte Informationen zu finden, um so Doppelarbeiten vermeiden zu können.

In der Sowjetunion sind bereits zwei (analogarbeitende) Maschinen für die Diagnose von Herzkrankheiten gebaut worden: ANEK und SINEK. Bei der Diagnose von Herzerkrankungen benutzt man heute Elektrokardiogramme (EKG), d. h. grafische Darstellungen der elektrischen Herzaktivität. Die Maschine SINEK ist ein elektronisches Modell des Herzens. Mit Hilfe verschiedener Schaltungen kann man bestimmte Störungen in diesem Modell hervorrufen und durch Vergleich der von ihm ausgegebenen Kurve mit dem zu untersuchenden EKG die Diagnose prüfen.

Die Maschine ANEK analysiert das Elektrokardiogramm und liefert grafische Darstellungen für die Funktionen der einzelnen Teile des Herzens und erleichtert so die Diagnose.

Im Moskauer Institut für Chirurgie wurde ein Rechenautomat für das Stellen von Diagnosen programmiert. In seinem Speicher sind Listen der Symptome vieler Krankheiten aufbewahrt. Hat die Maschine Angaben über den Zustand des Kranken erhalten, so kann sie mit einer für den Menschen unerreichbaren Schnelligkeit die Krankheiten nennen, deren Symptome mit den angegebenen übereinstimmen, und Behandlungsmethoden empfehlen.

Ebenso wichtig wie kompliziert sind die Probleme der automatischen Sprachübersetzung. Ein automatisches Bereitstellen aller Informationen über ein bestimmtes Gebiet, die bereits erarbeitet worden sind, erfordert ja, wenn es sinnvoll sein soll, nicht nur die Angabe einer Liste von Titeln, sondern es muss zu jedem Titel wenigstens eine Zusammenfassung in einer dem Interessenten verständlichen Sprache gegeben werden.

Bei der Vielzahl der Sprachen, in denen heute bedeutende wissenschaftliche Ergebnisse publiziert werden, ist dieses Problem mit menschlichen Übersetzern nicht mehr zu lösen. Zudem ist zu erwarten, dass die Anzahl der Publikationssprachen in dem Maße steigt, wie die Entwicklung der Wissenschaften in den jungen Nationalstaaten fortschreitet.

Die Kompliziertheit der Probleme, die bei der automatischen Übersetzung auftreten, kann hier nur angedeutet werden. Wer selbst einmal übersetzt hat, weiß, dass das Übersetzen wesentlich mehr erfordert als ein einfaches Ersetzen von Wörtern der einen Sprache durch Wörter der Sprache, in die übersetzt wird. Ganz abgesehen von Redewendungen, bei denen durch eine wörtliche Übersetzung nahezu niemals ihr eigentlicher Sinn erfasst wird, gibt es in allen Sprachen nicht nur mehrdeutige Wörter (wie im Deutschen z. B. "Bremse" - Insekt oder technische Einrichtung, "Bank" - Sitzgelegenheit oder Geldinstitut), die je nach dem Zusammenhang übersetzt werden müssen, sondern sogar mehrdeutige Sätze ("Das Mädchen stört die Frau" - wer stört wen?), deren Bedeutung aus dem Gesamtzusammenhang des zu übersetzenden Textes erschlossen werden muss.

In vielen Sprachen gibt es individuelle grammatische Konstruktionen, die in anderen Sprachen nicht vorkommen. Bei der Übersetzung mit derartigen Konstruktionen gebildeter Sätze müssen diese in der Sprache, in die sie übersetzt werden, entsprechend den grammatischen Regeln dieser Sprache vollkommen neu aufgebaut werden. Zu diesen komplizierten Problemen treten noch technische Schwierigkeiten hinzu.

Die Speicherkapazität der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Rechenautomaten reicht nicht im entferntesten aus, um den Wortschatz zweier Sprachen aufzunehmen. Je größer der gespeicherte Wortschatz ist, desto mehr wächst auch die Bedeutung der Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine, wie lange es nämlich dauert, bis die Maschine zu einem gegebenen Wort die als Übersetzung möglichen Wörter der Zielsprache aus dem Speicher herausgesucht hat.

Aus diesen Gründen verwendete man bei den ersten Übersetzungsexperimenten einen stark beschränkten Wortschatz. (Wörter, die die Maschine nicht übersetzen kann, weil sie in ihrem Speicher nicht enthalten sind, gibt sie unübersetzt wieder aus.)

Die erste Übersetzung aus der russischen Sprache in die englische wurde am 7. Januar 1954 auf der amerikanischen Maschine IBM 7011 vorgeführt. Der Wortschatz bestand aus je 250 Wörtern und das Programm aus 2400 Befehlen, die man zusammenstellte, nachdem man sorgfältig analysiert hatte, wie sich die Beziehungen zwischen den Wörtern im Russischen und im Englischen ausdrücken lassen und wie man ein und dieselbe Beziehung mit den Regeln der anderen Sprache formulieren kann.

Ende 1955 führte die sowjetische Maschine BESM die erste Übersetzung aus dem Englischen ins Russische durch; ihr Wortschatz bestand aus etwa je tausend Wörtern aus dem Gebiet der Mathematik. Nachdem die Maschine einen Auszug aus der Zeitung "Times" übersetzt hatte, übergab man ihr einen mathematischen Text über Differentialgleichungen. Die Maschine arbeitete einige Minuten, der Fernschreiber begann zu rattern, und auf einem Blatt Papier erschienen die Zeilen:

"Ob wir die zukünftige Bahn des Jupiters am Firmament oder die Bahn eines Elektrons im Elektronenmikroskop wissen wollen. wir nehmen zu Differentialgleichungen Zuflucht ..."

Bei der Übersetzung verschiedenartiger Literatur mit einem großen Wortschatz muss man nicht nur das Volumen des Speichers und die Arbeitsgeschwindigkeit vergrößern, sondern auch die Redundanz im Satzbau beseitigen. Wie bereits gesagt wurde, kommen die Wörter in Texten

verschiedener Sachgebiete nicht mit der gleichen Wahrscheinlichkeit vor.

Zu einem Erguss freundschaftlicher Gefühle benötigt man einen anderen Wortschatz als für Drohungen, und für amtliche Mitteilungen wurde sogar ein besonderer Stil entwickelt, der sich von dem der Umgangssprache unterscheidet. Mit anderen Worten?

Die Information über ein Wort muss Charakteristiken enthalten, die das Anwendungsgebiet des Wortes und seine Verbindung mit Gruppen anderer Wörter angeben; dann braucht die Maschine nicht Tausende oder Zehntausende von Vergleichen durchzuführen, um das Äquivalent in der anderen Sprache zu finden.

In einer Reihe von Experimenten schrieben elektronische Rechenmaschinen "von selbst" Liebesbriefe und Gedichte. Man verfolgte damit kein praktisches Ziel, sondern versuchte nur zu klären, inwieweit die den Worten zugeordnete inhaltliche Charakterisierung gelungen ist. So erschienen in einer amerikanischen technischen Zeitschrift Verse, die eine Maschine gewissermaßen aus Worten zusammengestellt hatte, die eine Beziehung zur Stimmung trauriger Verliebtheit haben.

Es zeigte sich, dass die Maschine bei der Auswahl dieser Worte aus allen möglichen Kombinationen die Forderungen in Bezug auf das Versmaß, die Reihenfolge der Reime und die Gesamtzahl der Zeilen im Gedicht genau erfüllte.

Das Bemerkenswerteste bei allen diesen so verschiedenen Anwendungen einer elektronischen Rechenmaschine besteht darin, dass es sich immer und überall um ein und dieselbe Maschine handelt, mit den gleichen Bauelementen, dem gleichen Speicher und dem gleichen Aufbau. Faktisch haben die Menschen eine Maschine konstruiert, deren Möglichkeiten sie selbst erst jetzt erkennen, eine Maschine, die zur Suche von Planeten im Weltall und zum Dominospiel, zur Steuerung der Erdölverarbeitung und zur Lösung von Kreuzworträtseln gleichermaßen geeignet (bzw. ungeeignet) ist.

Allein die Befehlsfolge des Programms verwandelt sie aus einem Übersetzer in einen Verwalter oder einen Schachspieler. "Eine große Ziffernrechenmaschine", sagt W. R. Ashby, "ist gerade dadurch bemerkenswert, dass sie bei einer entsprechenden Programmierung einem beliebigen dynamischen System isomorph werden kann."

So groß auch die Möglichkeiten der modernen elektronischen Rechenmaschinen sind, im Vergleich zu dem, was die Kybernetik erreichen will, sind sie doch noch ziemlich beschränkt. Wir sind gezwungen, der Maschine alle zu verwendenden Daten und Programme einzugehen, wobei jede Unbestimmtheit zu vermeiden ist. Das schafft bestimmte Unbequemlichkeiten, da sich mit der Vorbereitung der Daten und Programme für eine große, schnell arbeitende Maschine Hunderte von Menschen befassen müssen.

Es wäre schön, wenn die Maschine selbst Dokumente lesen und ihren Inhalt analysieren könnte, wenn sie den Inhalt der menschlichen Sprache aufnehmen und verarbeiten könnte, wenn sie alle Codes entziffern könnte, die die Menschen untereinander benutzen.

Die Versuche, diese Beschränktheit der Informationsrezeptoren von Maschinen zu überwinden, stoßen auf eine Schwierigkeit:

die außerordentliche Redundanz der üblichen Codes, die nicht einmal durch bemerkenswerte Stabilität gegenüber Störungen ausgeglichen wird. Jeder hat sicher schon einmal beim Telefongespräch z. B. "siebzehn" und "siebzig" verwechselt oder schlecht geschriebene bzw. gedruckte Wörter falsch gelesen.

Quantelung und Deltamodulation geschriebener oder gesprochener Wörter erzeugen jedoch Kodewörter sehr großer Länge, und zum Erkennen eines Kodewortes unter der Vielzahl der

möglichen ist eine Vielzahl von logischen Operationen erforderlich.

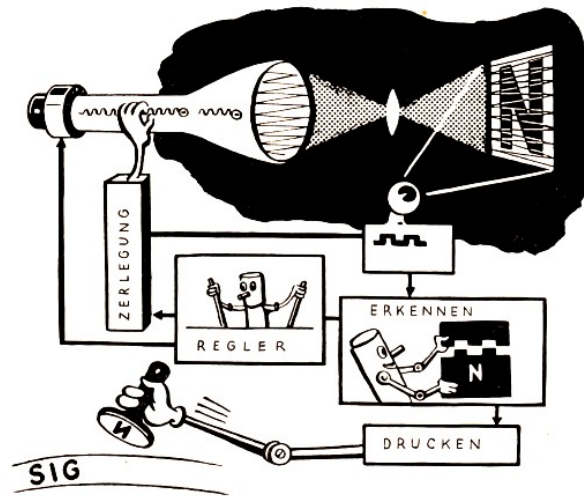


Bild 13.3.: Die lesende Anlage vom Typ "Ära" zerlegt das Bild der Buchstaben wie üblich. Die Hauptschwierigkeit bereitet das "Erkennen" der Buchstaben, wenn sie sich durch ihre Stärke, ihre Stellung auf der Zeile, Verzerrungen und ähnliche zufällige Störungen von dem Muster unterscheiden.

Dennoch wurden auf diesem Gebiet in letzter Zeit wesentliche Erfolge erzielt. Im April 1957 fand eine Vorführung des ersten englischen lesenden Automaten "Salartron-Ära" statt. "Ära" las maschinengeschriebene Texte mit einer Geschwindigkeit von 120 Zeichen in der Sekunde, und die Konstrukteure versprachen, die Geschwindigkeit der Maschine auf 500 Zeichen je Sekunde zu steigern.

Das bedeutet, dass sie eine normale Schreibmaschinen-Manuskriptseite in zwei Sekunden liest!

Die Bilder der einzelnen Buchstaben werden in dieser Maschine mit Hilfe eines Lichtstrahls abgetastet und in eine Folge von Signalen "schwarz - weiß" umgewandelt. Jedes abgetastete Zeichen wird dabei durch ein Kodewort mit 100 binären Einzelsignalen kodiert. Die weitere Arbeit der elektronischen Maschine besteht darin, unter Benutzung ihres Gedächtnisses das vorgelegte Zeichen - eine Ziffer oder einen Buchstaben - zu identifizieren.

Dabei müssen Verzerrungen beseitigt werden, die durch Besonderheiten der Schreibmaschinentypen, durch Mängel im Anschlag und ähnliche, zufällige Ursachen auftreten. Dazu dient ein Gerät, das in seinen Ausmaßen und in seiner Kompliziertheit einem Rechenautomaten wenig nachsteht. Dieses Gerät sucht in seinem Speicher das "ideale" Zeichen, das dem gelesenen am ähnlichsten ist, identifiziert es mit diesem und gibt ein Signal an einen Fernschreiber oder die Eingabe eines Rechenautomaten weiter, der auf diese Weise befähigt wird, z.B. Programme oder zu übersetzende Texte zu lesen. Analog arbeiten Maschinen, die handschriftliche Texte lesen. Eine solche Maschine kann also eine Schreibkraft ersetzen, vorausgesetzt, dass die Handschrift des Schreibers ganz deutlich ist.

Vor einigen Jahren berichtete die amerikanische Firma "Bell" von einer teilweisen Lösung des Problems, gesprochene Wörter zu kodieren. Ihre Anlage "Vocoder" war ursprünglich für die Umwandlung der Sprache in den Telegrafencode bestimmt (mit dem Ziel, die Durchlassfähigkeit der Telefonkanäle und die Stabilität der Übertragung gegen Störungen zu erhöhen).

Man beabsichtigte, am anderen Ende des Kanals eine Anlage aufzustellen, die die Arbeit der menschlichen Kehle und Zunge imitiert und den Telegrafensignalen entsprechende Worte ausspricht. Die damit verbundenen Probleme konnten aber während einer zwanzigjährigen Forschungstätigkeit nicht gelöst werden.

Der "Vocoder" kann aber als Hörhilfe für Taube verwendet werden, wenn er an ein System angeschlossen wird, das seine Ausgangssignale in Reizungen z.B. des Gesichtssinnes oder des Tastsinnes umwandelt. Im Prinzip unterscheidet sich die Anlage wenig von dem oben erwähnten lesenden Automaten. Sie muss ebenfalls die gesprochenen Wörter durch Kodewörter eines Binärkodes kodieren und dabei alles aussondern, was sich nicht auf die Bedeutung des Wortes bezieht, z. B. die Klangfarbe und die Höhe der Stimme, Nebengeräusche in den Räumen, den "Ausdruck" der Sprache usw.

Das Erkennen gesprochener Wörter durch Automaten ist natürlich auch notwendig, wenn man Maschinen durch gesprochene Befehle steuern will bzw. Maschinen konstruieren will, die die Funktion eines Dolmetschers haben. Sehr verlockend ist auch die Idee eines vorlesenden Automaten, der "Buchstaben"-Wörtern eine vorher gewählte Klangfarbe, einen "Ausdruck" usw. verleiht.

Nach befriedigender Lösung dieses Problems wäre eine automatische Synchronisation fremdsprachiger Filme in der Weise möglich, dass bei der Aussprache der deutschen Wörter durch den übersetzenden Automaten die Individualität in der Stimme des ausländischen Schauspielers erhalten bliebe, was beispielsweise beim Gesang besonders wichtig ist. Man könnte auch einer Aufzeichnung der Sprechweise eines längst gestorbenen Dichters deren Charakteristiken entnehmen und dann den Text seiner Werke von einem Automaten im Stil dieses Dichters vertragen lassen.

Das Erkennen ist die elementarste Operation, die das menschliche Bewusstsein unwillkürlich und in der Mehrzahl der Fälle vollkommen fehlerfrei durchführt. Erst jetzt, wo wir mit dem ganzen Arsenal der Elektronik versucht haben, diese Operation wenigstens teilweise technisch zu realisieren, ist klargeworden, wie kompliziert sie ist. Der Mathematiker W. Pitts bemerkte:

"Die Festlegung absolut exakter und starrer Regeln zur Erkennung des Buchstabens 'A' in allen üblichen Formen, die allein in gedruckten Texten auftreten, wäre eine gewaltige Aufgabe, wenn es überhaupt möglich ist, sie zu lösen."

Der Mathematiker O. Selfridge lehrte eine Maschine nach der Methode von "Versuch und Irrtum", Buchstaben zu unterscheiden; er entwickelte Operatoren zur Erhöhung des Informationsgehalts. Der sowjetische Mathematiker E. Brawerman löste dieses Problem mit einer statistischen Methode. Davon werden wir in den folgenden Kapiteln berichten.

Die Mitteilungen über die Möglichkeit des künstlichen Lesens und Hörens riefen bei vielen Menschen, die unglücklicherweise dieser Informationskanäle beraubt sind, die Hoffnung hervor, dass die Technik sie bald von den Schwierigkeiten befreie, die mit dem Lesen und Schreiben der Blindenschrift bzw. mit der Zeichensprache verbunden sind.

Tatsächlich könnte ein Blinder den Text gewöhnlicher Bücher und Briefe durch das Gehör oder den Tastsinn wahrnehmen, wenn er den vereinbarten Kode der "Ära" erlernt, und ein Tauber könnte mit Hilfe des "Vocoder" die lebendige Stimme optisch wahrnehmen.

Aber die Größe und der Preis dieser ersten komplizierten Analysatoren von Schrift und Sprache schließen diese Möglichkeiten für die nächste Zukunft aus. Die in diesen Systemen verwendeten Bauelemente, die Rezeptoren und Effektoren, müssen kleiner, billiger, kompakter, einfacher in der Herstellung, sparsamer und haltbarer werden; erst dann kann man alle Möglichkeiten, die in ihnen stecken, voll ausnutzen.

Die moderne Elektronik zeigt uns die Möglichkeit, diesen herrlichen Traum mit Hilfe von Halbleitern zu verwirklichen. Die Kristallgleichrichter und die Transistoren ersetzen die Vaku-

umdioden und -trioden. Sie benötigen dabei nur den hundertsten Teil der Energie, da sie nicht geheizt werden müssen; außerdem sind sie klein, haltbar und zuverlässig.

Unter Verwendung von Halbleitern konnten elektronische Rechenmaschinen gebaut werden, die in ein Flugzeug eingebaut werden können, stationären Maschinen in ihren Eigenschaften aber wenig nachstehen. Sie nehmen nicht mehr Raum ein als ein Fernsehgerät.

In dem Maße, in dem sich die Herstellung von Halbleiterbauelementen entwickelt und die Frequenzcharakteristiken verbessert werden, kann der Bauplan von elektronischen Rechenmaschinen gleichförmig als Netz von Matrizen mit bistabilen Elementen gestaltet werden. Nach und nach entfällt die Notwendigkeit, den Speicher in verschiedene Stufen zu teilen.

Die traditionellen Verfahren zur Fertigung elektrischer Schaltungen, das Vorbereiten von Fassungen für die Röhren, das Einlöten von Drähten, Kondensatoren, Widerständen und anderen Bauelementen sind durch die Technologie der gedruckten Schaltung überholt. Dabei werden alle elektrischen Verbindungen mit Farbe auf metallüberzogene Isolatorplatten gedruckt, in die kleine Löcher zur Aufnahme der Anschlussdrähte der einzusetzenden Bauelemente gestanzt sind.

Die bedruckte Platte wird mit Säure so geätzt, dass das Metall nur an den Stellen stehenbleibt, die durch die Farbe geschützt sind. Anschließend wird die Platte mit den Bauelementen der Schaltung bestückt, d. h., die Anschlussdrähte werden in die vorgesehenen Löcher eingeführt und in ein Lötbad getaucht, wodurch alle nötigen Verbindungen in einem Arbeitsgang hergestellt werden.

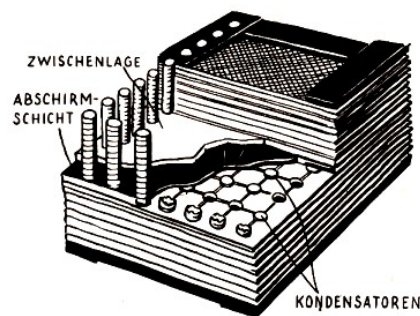


Bild 13.4.: Der Festwertspeicher DESU (langfristige kapazitive Gedächtniseinrichtung) ist einfach ein Paket von zusammengehefteten Blättern mit Zwischenlagen und Abschirmschichten. Auf jedes Blatt ist ein Netz von Kondensatoren gedruckt. Beim Einspeichern werden, entsprechend dem Kodewort, das aufbewahrt werden soll, Kondensatoren aus dem Blatt herausgeschnitten.

Im Laboratorium für Elektromodellierung an der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde der Festwertspeicher "DESU" entwickelt. Auf Papierblätter sind die Elektroden kleiner Kondensatoren gedruckt, die als Speicherelemente dienen. Die Kodewörter (Tabellen, Wörterbücher, Steuerprogramme) werden dadurch fest gespeichert, dass man Kondensatoren durch Lochung entfernt (0) oder beibehält (1).

Bis zu tausend solcher Blätter werden abwechselnd mit Zwischenlagen und Abschirmfolien zu einem Päckchen zusammengelegt und zu einem festen Block gepresst, in dem dann bis zu einer halben Million bit Information gespeichert ist. Für elektronische Rechenautomaten spielen solche Blöcke die Rolle von Nachschlagewerken, Büchern und Lexika.

Theoretiker sagen voraus, dass es in Zukunft möglich sein wird, alle Teile der Maschinen aus den gleichen Bauelementen aufzubauen. Das wird es ermöglichen, die Herstellung der Maschinen zu vereinfachen.

Die sogenannte Molekularelektronik untersucht die Möglichkeit, mikroskopisch kleine Elemente für elektronische Maschinen herzustellen. Dabei werden die Bauelemente mit den verschiedensten Verfahren (durch Aufdampfen dünner Schichten im Vakuum, Behandlung von Kristallen mit Elektronenstrahlen oder Ultraschall, Steuerung des Auskristallisierens u. a.) nicht mehr aus einfacheren Elementen zusammengesetzt, so wie man einen Verstärker aus Transistoren, Widerständen, Kondensatoren usw. aufbaut, sondern - grob gesagt - aus einzelnen Molekülen konstruiert. Dementsprechend entstehen so Blöcke, die für sich genommen eine logische Funktion oder z. B. die Funktion eines Triggers realisieren.

Damit werden kybernetische Systeme möglich, die in ihrer Kompaktheit und ihrem niedrigen Energieverbrauch alle gegenwärtig vorhandenen elektronischen Geräte hundert- und tausendfach übertreffen und an die lebenden Neuronen heranreichen.

Das bedeutet aber, dass wir mit der Zeit vielleicht universelle logische Maschinen und Systeme von solchen Maschinen mit Millionen und Milliarden von Elementen erhalten, wobei die Maschinen in ihren Ausmaßen und ihrer Masse nicht größer sind als irgendein lebendes Gehirn.

In solchen Systemen ist es nicht notwendig, ein bestimmtes Zentrum als Rechenwerk für die Ausführung aller Operationen auszuzeichnen, es ist dann auch nicht notwendig, die Information zur Verarbeitung aus einem Speicher, in dem sie aufbewahrt wird, in das Rechenwerk zu transportieren. Man kann im Gegenteil das Verarbeiten und Speichern der Informationen von denselben Elementen vornehmen lassen, wie das vermutlich das lebende Gehirn tut.

Auf diesem Wege erwarten uns viele unangenehme Überraschungen. Denn für das normale Funktionieren eines Signalsystems ist allein eine Struktur, so stabil sie auch sein mag, nicht ausreichend. In der Struktur muss ein riesiger Komplex von Informationen gespeichert und verarbeitet werden. Und hier kann jeder Fehler bei einem Nachlassen der Kontrolle zu schwerwiegenden Folgen führen.

Entsteht in irgendeinem Stadium eine unkontrollierte und unbeabsichtigte Rückkopplung, so können Schwingungen entstehen, die sich immer weiter ausbreiten und zu einer "Epilepsie" der Maschine, einem Krampfanfall, führen. Infolgedessen verkleinert sich die arbeitsfähige Zone der Maschine, und es tritt das ein, was die Ärzte "Dementia" nennen, eine erworbene "Schwachsinnigkeit".

Aber bei aller Ähnlichkeit mit der bewussten Tätigkeit des menschlichen Gehirns unterscheidet sich die Arbeit einer Maschine nicht nur vom Denken des Menschen, sondern auch vom Verhalten jedes Lebewesen dadurch, dass nicht eine Handlung der Maschine ihren eigenen Bedürfnissen entspringt, von ihr selbst benötigt wird.

Die Prinzipien ihres Handelns sind von vornherein so festgelegt, dass der Wille des Menschen, des Eigentümers und Schöpfers der Maschine, das Entscheidende ist. Dieser Wille des Menschen stellt die Aufgaben, auf deren Lösung die ganze Tätigkeit der Maschine gerichtet ist.

Blaise Pascal sah diese Beschränkung voraus, als er schrieb:

"Die Rechenmaschine führt Operationen aus, die dem Denken von Lebewesen ähnlich sind, aber sie tut nichts, was auf das Vorhandensein eines eigenen Willens schließen ließe."

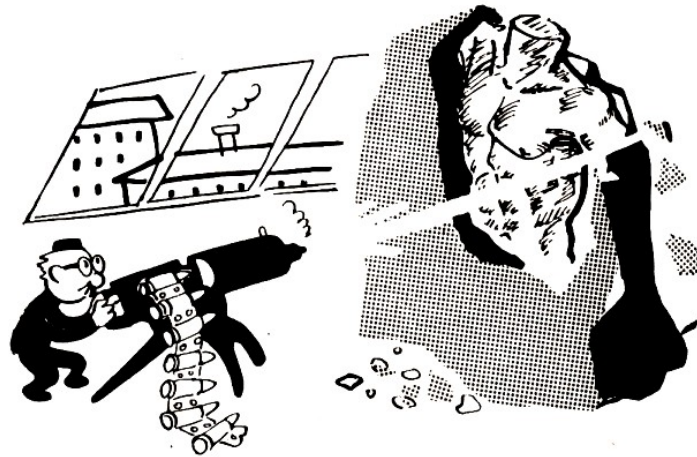
Dreihundert Jahre später sprach Albert Einstein den gleichen Gedanken aus:

"Eine Maschine kann jede Aufgabe lösen, aber nicht eine einzige stellen."

Dieser Gedanke ist interessant, und man kann darüber streiten, ob er richtig oder falsch ist.



## **14 Stochastische Maschinen, sie besitzen einen "freien Willen" und sind fähig zu abstrahieren**



Ein Streit mit Paul Cossa - Der "freie Wille", das ist nichts anderes als das Rauschen! - Buridans Esel und die einarmigen Banditen - Eine schreibende Maschine - "Teilweise geliehene" Melodien - Literatur oder Pathologie? - Eine stochastische Maschine am Steuerpult - Zwei extreme Charaktere: der Übervorsichtige und der Abenteurer - Am Richtertisch und im Arbeitszimmer des Untersuchungsrichters - Kann eine Maschine erfinden? - Ist sie zur Selbstkritik fähig? - Abstraktion - Das entscheidende Experiment - die Maschine abstrahiert.

In vielen Büchern, die in der einen oder anderen Weise die Kybernetik berühren, trifft man immer wieder auf die Bemerkung, dass eine Maschine im Gegensatz zum menschlichen Gehirn nach einem Programm arbeitet, das der Mensch für sie ausgearbeitet hat, dass ihre Operationen streng vorgeschrieben sind und dass das für alle Zeiten so bleiben wird.

In dieser Überlegung ist ein Körnchen Wahrheit enthalten: Kein System kann ohne irgendeinen Informationsvorrat etwas anderes liefern als sinnloses Rauschen. Im wesentlichen ist sie aber falsch, denn erstens enthält die Maschine die minimal notwendige Information möglicherweise nicht in Form eines Programms, sondern in ihrem Aufbau selbst.

Zweitens erhält die Maschine die zur Realisierung verschiedener Verhaltensweisen notwendige Information möglicherweise nicht in Form von Befehlen, von streng festgelegten Programmen, sondern in Form von Ratschlägen, Beispielen und Wünschen - mit einem Wort, als unvollständige Information - und nicht vom Menschen, sondern von dem umgebenden Medium.

Man kann eine (sogar verhältnismäßig einfache) Maschine konstruieren, die überhaupt kein Programm hat (wenn man nicht den Aufbau der Maschine als Programm ansieht) und doch die verschiedensten Tätigkeiten ausführen kann: Sie kann dichten und komponieren, sich unterhalten und streiten, Raketen und Flugzeuge steuern, kurz gesagt, sie kann zu einer universellen Steuermaschine werden.

Dabei handelt es sich um eine stochastische Maschine. In diesem Kapitel wollen wir uns mit den Arbeitsprinzipien stochastischer Maschinen, einigen Konstruktionsvarianten und den Beschränkungen, denen sie unterliegen, beschäftigen.

Ich bin sicher, dass viele Menschen die Eigenschaften dieser Maschinen für unglaublich halten. Vor kurzem erst erschien in Moskau die russische Übersetzung des Buches: "La Cybernetique" von dem französischen Psychiater Paul Cossa. Sein ganzes Streben ist darauf gerichtet, in diesem Buch die Begriffe "automatisch" und "vernünftig" gegeneinander abzugrenzen,

die begrenzten Fähigkeiten der Maschine und die angeblich unbegrenzten Möglichkeiten des menschlichen Gehirns einander gegenüberzustellen.

Bei einem präzisen Gebrauch der Ausdrücke darf man der "automatischen" (selbsttätigen) Steuerung eines Systems nur die "nichtautomatische" Steuerung (von außen) gegenüberstellen. Leider haben nur die Kirchenväter den Gedanken vollkommen konsequent vertreten, dass die Persönlichkeit und das Verhalten des Menschen nicht gegen steuernde Information abgeschlossen, nicht automatisch sind, da Gott das Handeln der Menschen lenkt.

Diese Autoritäten erklären, dass - wenn man es in der Sprache der Kybernetik ausdrückt - in der Welt nur ein wirklicher Automat existiert, der sich als einziger vollkommen selbständig und unkontrolliert steuert, nämlich Gott.

Diese Auffassung kann man einer naturwissenschaftlichen Betrachtung nicht zugrunde legen. Weder hat man einen "allerhöchsten Automaten" in der Natur entdeckt, noch kennt man Übertragungskanäle und Signale, mit deren Hilfe er lenkend in das menschliche Verhalten eingreifen könnte. Darauf beharrte auch Paul Cossa nicht.

Er versuchte gar nicht einmal zu definieren, was das "Nichtautomatische" des Verstandes sein soll. Cossas Hauptbeitrag zu der Polemik um die Möglichkeiten von Maschinen war die Formulierung von fünf Einschränkungen, denen die Fähigkeiten automatischer Maschinen angeblich immer unterliegen werden, die aber jene des Verstandes nicht einengen können.

Diese Einschränkungen sollen hier näher betrachtet werden:

"Eine Maschine kann die Grenzen der Prädestination nicht überschreiten", lautet die erste These von Cossa. Unter "Prädestination" wird hier offensichtlich das verstanden, was man gewöhnlich als Programmsteuerung bezeichnet.

Man denkt unwillkürlich an die zahlreichen "Beweise" der gleichen Einschränkung für den Menschen, an die "Beweise" dafür, dass der Mensch seinem Schicksal nicht entinnen könne, um die schon in der Antike, vor mehr als zweitausend Jahren, heftig gestritten wurde.

Es scheint sonderbar, aber in Wirklichkeit überschreitet jede auf der Welt existierende Maschine die "Grenzen der Prädestination" wesentlich öfter und deutlicher als der Mensch: Sie geht entzwei, sie gerät aus dem Konzept, sie beginnt bei einem Nachlassen der menschlichen Kontrolle Ausschuss zu produzieren, obwohl nichts in ihrem Programm einen solchen Effekt vorsieht.

Die Ingenieure hätten es entschieden leichter, wenn die Behauptung Cossas, dass eine "für ein bestimmtes Programm konstruierte Maschine dessen Grenzen nicht überschreiten kann", wenigstens zu einem kleinen Teil der wahren Lage der Dinge entsprechen würde.

Generationen von Ingenieuren bemühen sich im Gegenteil - mit wechselndem Erfolg - darum, dass eine sich selbst überlassene Maschine die "Grenzen der Prädestination" möglichst selten überschreitet. Gerade in unserer Zeit ist dieses Ziel nur unter großen Schwierigkeiten zu erreichen.

Wir bauen heute so komplizierte und vielgestaltige Maschinen, dass es praktisch unmöglich ist, eine vollständige Prädestination ihrer Arbeit zu verwirklichen. Bei einer Reihe von Werkzeugautomaten, die zu einer automatischen Taktstraße - einem einheitlichen System - verkoppelt sind, besteht zu jeder einzelnen Maschine eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie eine Panne hat.

Bei einer Panne wird die Taktstraße automatisch blockiert - alle übrigen Maschinen unterbrechen die Arbeit so lange, bis der Schaden behoben ist.

Eine einfache Rechnung zeigt, dass ein derart automatisiertes Werk einen großen Teil der Ar-

beitszeit stillstehen würde, weil immerzu eine der vielen Maschinen reparaturbedürftig wäre.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, große Maschinensysteme zu schaffen, deren Arbeit man schon dann als befriedigend ansehen kann, wenn die überwiegende Mehrzahl ihrer Teile befriedigend arbeitet. Dazu baut man in automatischen Taktstraßen Speicher für halbfertige Produkte und Verzweigungen ein, die es ermöglichen, die Produktion in allen Abschnitten aufrechtzuerhalten außer in dem, wo gerade eine Reparatur durchgeführt werden muss.

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung, die einstmals hinter grünen Tischen im Rausch der Glücksspiele geboren wurde, ist heute zu einer Grundlage für die Projektierung automatischer Systeme geworden und liegt der Bedienungstheorie zugrunde.

Bei der Lösung komplizierter Aufgaben auf elektronischen Rechenmaschinen benutzt man immer häufiger die sogenannte Monte-Carlo-Methode, bei denen zufällige Größen im Rechenprozess verwendet werden. Dabei verwendet man Tabellen zufälliger Zahlen oder sogenannte Generatoren für zufällige Größen. Das sind spezielle Geräte, die korrelationsfreies Rauschen erzeugen. So können unter anderem auch elektronische Rechenmaschinen selbst als derartige Generatoren wirken, wenn man sie nach einem speziellen Programm arbeiten lässt.

Dazu ist zu bemerken, dass die Erzeugung von "vollkommenem Unsinn" oder "absoluter Sinnlosigkeit", d. h. von korrelationsfreiem Rauschen, ein kompliziertes technisches Problem ist.

Muster von absolutem Unsinn haben einen bestimmten Wert. Die folgenden Ziffern stammen aus der "Tabelle der zufälligen Zahlen" von M. Kadyrow, die 1936 in Taschkent herausgegeben wurde:

2876	1273	7870	2030	8417	2367
7032	1003	3979	8650	3430	0635

Der Autor verbürgte sich mit seiner wissenschaftlichen Autorität dafür, dass alle Ziffern der Tabelle vollkommen zufällig angeordnet sind und dass es zwischen ihnen keinen Zusammenhang gibt. Es ist jedoch praktisch unmöglich, zuverlässiges Rauschen dadurch zu erhalten, dass man einen Menschen auf gut Glück ohne jeden Zusammenhang eine Folge von Grundziffern aus dem Dezimalsystem auf ein Blatt Papier schreiben lässt.

Eine Analyse so erhaltener Muster zeigt sofort, dass der auf die Probe gestellte Mensch beispielsweise eine seltsame Sympathie für die Rundungen der 8 hat, dass er die Existenz der Ziffer 7 ignoriert und aus irgendeinem Grunde geneigt ist, gerade Ziffern unbedingt hinter ungerade zu setzen.

Was "unmotivierte" und nicht vorherzusagende Lösungen angeht, so sind maschinelle Erzeuger zufälliger Größen bedeutend zuverlässiger als der Mensch mit seinem "freien Willen", der unweigerlich verschiedenen unwillkürlichen Einschränkungen unterliegt. Übrigens treten in den technisch erzeugten Folgen zufälliger Zahlen manchmal Unvollkommenheiten auf.

Selbst die Würfel, die sehr alte Erzeuger zufälliger Größen sind, versagen, es macht sich der Einfluss von Ungenauigkeiten bei ihrer Herstellung bemerkbar. Im Jahre 1900 würfelte der Mathematiker Welldon mit beneidenswerter Geduld 26306 mal und schrieb nach jedem Wurf das Ergebnis des Versuchs auf. Er stellte fest, dass selbst nach dieser großen Zahl von Versuchen die relative Häufigkeit für das Auftreten einer bestimmten Zahl noch merklich von der Zahl  $1/6$ , der Wahrscheinlichkeit dafür, diese Zahl mit einem "idealen" Würfel zu werfen, abwich.

Nicht nur bei Cossa begegnet man folgender Frage: Kann eine Maschine irgendwann einmal, in einer phantastisch fernen Zukunft, einen "freien Willen" besitzen oder nicht?

Die Antwort ist klar: Definiert man den "freien Willen" exakt, so stellt sich sofort heraus, dass heute existierende Maschinen, z. B. die bekannten amerikanischen Spielautomaten "Einarmiger Bandit", diese Eigenschaften in höherem Maße besitzen als der Mensch. Der "Einarmige Bandit" ist einfach ein Stahlkasten, der in eine Wand oder eine Säule fest eingebaut ist. Er hat eine Eingabeöffnung, eine Ausgabeöffnung und einen Griff (den Arm). Ein in die Eingabe geworfenes Geldstück gibt den Griff frei, und man kann ihn herunterdrücken, wodurch der Automat in Betrieb gesetzt wird.

Manchmal fällt dabei aus der Ausgabe viel Geld, manchmal gar keins. Jeder, der Lust hat, kann den Automaten tagelang beobachten, und die Reihenfolge der Gewinne und Verluste aufschreiben, um irgendein "Programm" irgendeine Gesetzmäßigkeit festzustellen und den Automaten zu schlagen. Aber er verliert seine Zeit umsonst, da der Mechanismus des Automaten ein zuverlässiger Erzeuger zufälliger Größen ist. Die Maschine arbeitet dabei mit Gewinn, ein Teil des eingeworfenen Geldes bleibt in ihrem Innern für ihren Besitzer zurück.

Es ist praktisch notwendig, jedem komplizierten automatischen System eine gewisse "Entschädigungsfreiheit" zu belassen. d. h., dass die Maschine eine Entscheidung zufällig treffen kann, wenn die ihr verfügbaren Informationen über die möglichen Alternativen ihr diese Alternativen für das Erreichen des ihr gestellten Zieles gleichwertig erscheinen lassen.

Das bestätigt unter anderem das alte Gleichnis vom "Esel des Buridan". Dieser Esel war, wie der französische Philosoph I. Buridan (1297-1358) erzählte, ein großer Freund des Nachdenkens. Wegen dieser Neigung verhungerte er, obwohl rechts und links von ihm Heuhaufen lagen. Das Unglück geschah deshalb, weil beide Haufen vollkommen gleich waren und in gleicher Entfernung von dem Maul des Esels lagen, so dass er keinen Grund hatte, einen dem anderen vorzuziehen und mit diesem zu beginnen.

Kein Gedächtnis und keine Logik kann einem Automaten aus dieser Verlegenheit helfen. Das hat Buridan mit seinem erfundenen formalistischen Esel gezeigt. In einer Situation, in der die Argumente "für" und "wider" vollkommen gleich sind, finden wir Menschen nach einer Überlegung gewöhnlich ein zwar eingebildetes und unsicheres, aber dennoch scheinbar logisches Argument zugunsten einer Alternative.

Aber das, was uns möglich ist, ist einem Wurm zum Beispiel unmöglich. Bisher ist jedoch kein Wurm an Unentschlossenheit gestorben. Wenn es für ihn keinen Grund gibt, diese oder jene Bewegungsrichtung vorzuziehen, so kriecht er einfach so, ohne jeden Grund nach rechts oder nach links, vorwärts oder rückwärts.

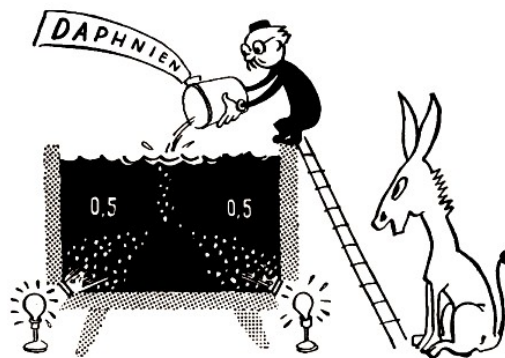


Bild 14.1.: Die Daphnien in den Versuchen von Alverdes verhielten sich nicht so wie der legendäre Buridansche Esel: Sie wählten zufällig einen von den beiden möglichen Wegen zum Licht.

Im Jahre 1924 führte der Zoologe Alverdes einen Versuch durch, bei dem sich Wasserflöhe in der Lage des Buridanschen Esels befanden. Die Wasserflöhe, die stets zum Licht schwimmen,

wurden durch eine Öffnung in ein Aquarium eingelassen, die gegenüber zwei völlig gleichen Lampen gleich weit entfernt angebracht war.

Solange die Wasserflöhe weit von den Lampen entfernt waren, schwammen sie auf die Mitte zwischen den Lampen zu. Sobald sie den Lampen näher kamen, so entschieden sie sich unbedingt für eine Lampe, und der "Punkt der Entscheidung", wie ihn Alverdes nannte, war bei allen annähernd derselbe; dabei schwammen zu jeder Lampe gleich viele Wasserflöhe.

In der Technik kennt man den Begriff des "toten Punktes" einer Bewegung. Wenn man seine Existenz nicht berücksichtigt, wenn man keine Mittel zur Überwindung der toten Punkte vorsieht, so kann keine Dampfmaschine und kein Motor arbeiten. Offenbar können auch in Signalsystemen derartige tote Punkte auftreten, und der Automat muss einen Ausweg aus dieser Lage finden können.

Ist das System kompliziert genug, so ergibt sich der Ausweg von selbst. Ist der Automat in eine logisch nicht entscheidbare Lage geraten, so wiederholt er eine Folge von Operationen immer wieder, bis er es irgendwann nicht mehr tut. Mit der Anzahl der Elemente wächst die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers, und der Automat ist damit gegen die Falle des Buridan gesichert. Er findet sich um so leichter heraus, je niedriger die Qualität seiner Konstruktionselemente ist.

Das, was man in gewöhnlichen Maschinen als ernsthaften Mangel ansieht, Rauschen und Störungen, kann also für einen Automaten notwendig und nützlich sein. Die zufälligen Funktionsfehler der Elemente bilden nach der Auffassung des Mathematikers O. Schmidt "die Grundlage von Phantasie und Initiative bei Rechenmaschinen, die sich zum Beispiel in der Bereitschaft äußern, eine wahrscheinliche Lösung anzunehmen, auch wenn sie nicht vollständig bewiesen ist, und in dem Wunsch, nur das Erkennen einer entfernten Analogie zu versuchen, auch wenn man sie nicht vollständig beweisen kann".<sup>56</sup>

In einfache Systeme muss man dazu eine spezielle Rauschquelle einbauen.

W. R. Ashby konstruierte 1948 ein Gerät, das als "Homöostat" bezeichnet wird. Es besteht aus vier Potentiometern, die untereinander auf jede mögliche Weise direkt und durch Rückkopplungen verbunden sind. Sind die Abgriffe aller vier Potentiometer in Mittelstellung, so treten in den Verbindungen keine Signale auf, das System befindet sich in seinem einzigen Gleichgewichtszustand.

Dreht man einen Abgriff aus der Mittelstellung, so wird das Gleichgewicht gestört; Signale über die Abweichung gelangen zu Mechanismen, die die Abgriffe der anderen Potentiometer bewegen und auch diese aus der Mittelstellung bringen. Dadurch entstehen neue Signale, die die Stellungen der Potentiometerabgriffe weiter ändern und damit den Zustand des Gesamtsystems. Das System ist so konstruiert, dass es, so lange es auch dauern mag, letzten Endes wieder seinen stabilen Zustand erreicht, d. h. den Zustand, bei dem das System im Gleichgewicht ist, seinen Zustand also von selbst nicht mehr ändert.

"Das System verhält sich ähnlich wie eine schlafende Katze, die, wenn man sie anstößt, sich bequemer hinlegt und wieder einschläft", bemerkte ein Wissenschaftler hierzu. Dabei ist es unwesentlich, dass der Gleichgewichtszustand gerade dann vorliegt, wenn alle Potentiometerabgriffe in der Mittelstellung sind - durch eine entsprechende Abstimmung der Rückkopplungen kann jeder andere Zustand des Systems als Gleichgewichtszustand ausgezeichnet werden. Wenn die Rückkopplungen so abgestimmt sind, dass das System überhaupt einen Gleichgewichtszustand besitzt, dann findet ihn das System auch. Dazu besitzt es eine spezielle Einheit, die zufällige Signale an die Potentiometer liefert und dadurch die Stellungen der Abgriffe än-

---

<sup>56</sup>The Design of machines to simulate the behavior of the human brain. Trans IRE, EC-5. Nr. 4 (1956).

dert.

Diese Einheit wird in dem Moment ausgeschaltet, wenn der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der Homöostat besitzt 390625 verschiedene Zustände. Das Auffinden des Gleichgewichtszustandes dauert im Durchschnitt etwa eine Stunde. Natürlich arbeiten die mit Dämpfungsgliedern versehenen elektromechanischen Einrichtungen zur Verstellung der Potentiometerabgriffe sehr langsam. Ein analoges elektronisches System würde den Gleichgewichtszustand ungleich schneller finden.

In keinem realen Medium ist ein vollständiger Automat mit einer so kleinen Anzahl von Regelungen "lebensfähig". Berechnungen haben aber ergeben, dass die Zeit für das Auffinden eines Gleichgewichtszustands beispielsweise bei 100 zu regelnden Einheiten die Länge aller geologischen Zeitalter sogar dann weit übersteigt, wenn man die schnell arbeitende Elektronik benutzt.

Bedeutet das, dass komplizierte stochastische Maschinen nicht praktisch verwendungsfähig sind, weil sie zu langsam arbeiten? Nein!

Beim Homöostaten dauert die Suche nach einem Gleichgewichtszustand deshalb so lange, weil während dieser Suche alle Zustände gleichberechtigt behandelt werden, d. h., es wird insbesondere keine Information über einen bereits früher einmal erreichten Gleichgewichtszustand beim Suchen benutzt.

Eine stochastische Maschine, die, wenn sie durch eine Einwirkung aus dem Gleichgewichtszustand gebracht worden ist, nun nicht beliebige (zufällige) Zustände daraufhin prüft, ob sie unter den neuen Bedingungen Gleichgewichtszustand sind, sondern - dem Prinzip folgend, dass kleine Einwirkungen vielfach nur kleine Änderungen in der Abstimmung der Rückkopplungen zur Folge haben - zunächst nur solche Zustände in Betracht zieht, die dem zuvor erreichten Gleichgewichtszustand in einem gewissen Sinne "benachbart" sind, wird wesentlich schneller zum Ziel, zu einem neuen Gleichgewichtszustand, finden.

Als "benachbart" könnte man dabei z. B. Zustände des Homöostaten bezeichnen, bei denen die Stellungen der Potentiometerabgriffe höchstens um einen bestimmten Betrag differieren. Diesem Betrag entsprechend kann man also verschiedene Stufen der "Nachbarschaft" von Zuständen einführen.

Beim Suchen nach einem neuen Gleichgewichtszustand wird die Maschine also vom alten Gleichgewichtszustand ausgehen und dessen "engste Nachbarn" per Zufall ausprobieren; wenn dabei kein Gleichgewichtszustand gefunden wird, vergrößert die Maschine den betrachteten Bereich, indem sie die Stufe der "Nachbarschaft" verändert und nun zufällig unter den "weiter benachbarten" Zuständen auswählt und prüft.

Eine stochastische Maschine ist also zu einer verfolgenden Suche fähig; die Stufe der "Nachbarschaft" ist für sie ein neues Merkmal, das von den beiden Hauptmerkmalen gewöhnlicher Maschinen - der Schnelligkeit und dem Gedächtnisvolumen - unabhängig ist. Es ist jedoch bequem, zur Kennzeichnung dieses neuen Merkmals die reziproke Größe zu verwenden, die man als Disziplin bezeichnen kann. In digital arbeitenden stochastischen Maschinen ist die Disziplin eine Anzahl von Bit, die zwischen Null und der Gesamtkapazität des Speichers schwankt. Bei der Disziplin Null ist die Maschine ein Generator zufälliger Größen, und bei dem Maximum der Disziplin arbeitet die Maschine vollkommen determiniert.

Die zweite Einschränkung von Paul Cossa lautet: "Eine Maschine kann nichts lernen."

In dem Buch "La Pensée Artificielle" (Künstliches Denken) von P. Latil ist ein Gedankenversuch

mit einer großen elektronischen Maschine angeführt, die verschiedenartige, sehr komplizierte Aufgaben lösen kann, es aber ablehnt, mit einem Jungen Versteck zu Spielen, weil sie "kein Programm für das Versteckspiel hat".

Dieses Beispiel griffen andere Autoren begeistert auf, um die Maschinen herabzusetzen und die "Unmöglichkeit eines elektronischen Gehirns" zu beweisen.<sup>57</sup> Es ist seltsam, dass diese Autoren nicht berücksichtigten, dass die Maschine sich erstens nicht verstecken, ja nicht einmal bewegen kann.

Zweitens können auch alle kleinen Jungen lange Zeit nicht Versteck spielen und antworteten auf einen entsprechenden Vorschlag: "Was ist das? Ich kann das nicht."

Kinder, die von Geburt an Versteck spielen können, gibt es einfach nicht. Sie werden später, wenn man sich so ausdrücken darf, von anderen Kindern "programmiert". Dieser Prozess besteht immer in einer Zurückführung des unbekanntes Spiels auf bekannte Handlungen. "Kannst du laufen? Kannst du bis zur Ecke oder zum Zaun laufen, während ich nicht hinsehe? Kannst du dich so hinstellen, dass ich dich nicht sehe?" fragt der erfahrene Junge den Neuling. "Verstanden? Nun, dann lauf!" Es gibt keinen Grund, der eine Maschine nach einer solchen Instruktion hindern könnte, in einer ihr angemessenen Form Versteck zu Spielen, etwa das Verstecken eines über Funk steuerbaren Wagens.

Das Lernen ist also eine notwendige Etappe dafür, dass automatische Systeme von dem, was sie können, zu dem, wozu sie im Prinzip fähig sind, was sie aber noch nicht können, übergehen. Leider sind die Begriffe "lernen" bzw. "gelehrt" noch nicht klar definiert, zumindest muss man verschiedene Arten oder Stufen des Lernens unterscheiden.

Man ist der Meinung, dass man die Deponierung eines Programms und eines Wörterbuchs für die automatische Übersetzung in einer elektronischen Rechenmaschine nicht als Lernen bezeichnen sollte, obwohl das Ergebnis dieser Operation mit dem Ergebnis des Lernens der Studenten in Fremdsprachenlehrgängen übereinstimmt: Die Maschine war vorher nicht fähig, Texte zu übersetzen. und nachdem sie das Programm erhalten hat, besitzt sie diese Fähigkeit.

Intuitiv kann man sagen, dass ein "wirkliches" Lernen, das dem menschlichen ähnlicher ist, mit der Sammlung von Information verbunden ist, bei der eventuell vorhandene unvollständige Information benutzt wird, also ein Prozess, bei dem unvollständige Information nach Möglichkeit vervollständigt wird.

Vor drei Jahren baute in Moskau eine Gruppe von Studenten des Instituts für Energetik in Zusammenarbeit mit dem Psychiater S. N. Braines eine Maschine, die "unterrichtet" werden kann. Sie entstand im Zusammenhang mit Forschungen über die Herausbildung bedingter Reflexe bei Hunden und mit einigen Hypothesen über die Rolle der Neuronen in der Großhirnrinde bei der Entstehung von Reflexen.

Das Eingabewerk dieser Maschine besteht aus drei Knöpfen und einer besonderen Taste B, der "Bekräftigung", als Ausgabewerk dienen drei Lampen. Die Anlage arbeitet stochastisch - beim Drücken eines beliebigen der drei Knöpfe leuchtet genau eine der drei Lampen auf, aber es ist unmöglich vorauszusagen, welche. Unabhängig davon, welcher Knopf gedrückt wird, ist die Wahrscheinlichkeit, aufzuleuchten, für jede der drei Lampen gleich  $1/3$ .

Diese Wahrscheinlichkeit ändert sich jedoch, wenn man eine bestimmte Kombination von Knopfdruck und Aufleuchten einer bestimmten Lampe durch Drücken der Taste B bekräftigt. Betätigt man diese Taste beispielsweise jedesmal dann (aber auch nur dann), wenn auf ein

---

<sup>57</sup>S. Rowenski, A. Ujomow, J. Ujomowa: Maschine und Gedanke. Passat-Bücherei Bd. 44, Urania-Verlag, 1962. Seite 168.

Drücken des ersten Knopfes die zweite Lampe aufleuchtet, so wird das "Bekräftigen", dieser Kombination von der Maschine gespeichert, und nach einer gewissen Anzahl von Versuchen ändert die Maschine sprunghaft ihr Verhalten:

Beim Drücken des ersten Knopfes reagiert sie stets mit: einem Aufleuchten der zweiten Lampe, d. h., die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die zweite Lampe aufleuchtet, wenn man den ersten Knopf drückt, ist gleich 1.

Das Gerät erregte das Interesse der Industrie. Es wird jetzt die Möglichkeit untersucht, solche Systeme zur Steuerung von Produktionsprozessen, z. B. der Herstellung von synthetischem Kautschuk, zu benutzen. Darüber wurde ein Film "Gehirn und Maschine" gedreht, der auf der ständigen Ausstellung "Errungenschaften der Volkswirtschaft der UdSSR" gezeigt und ausgezeichnet wurde.

Das Interesse der Industrie an einem Modell, das zunächst völlig primitiv erscheint, ist dadurch zu erklären, dass eine große Anzahl von Produktionsprozessen sich nur sehr schwer algorithmisieren, d. h. in eine überschaubare Kette von Aktionen und logischen Entscheidungen zerlegen lässt.

Ein guter Arbeiter regelt einen Prozess, beispielsweise das Schmelzen von Stahl, teilweise nach dem "Gefühl", das er sich während vieler Jahre erworben hat. Er kann im allgemeinen keine vollständige Information darüber geben, von welchen Prinzipien er sich bei seinen Entscheidungen leiten lässt. Ein schlechter Arbeiter fabriziert immer wieder Ausschuss, obwohl er unter den gleichen Voraussetzungen produziert wie ein guter.

Eine verlockende Idee entsteht: Eine Maschine müsste einen guten Arbeiter intensiv bei der Arbeit beobachten und sich dabei die ihm selbst unklaren Verfahren aneignen, diese durcharbeiten, um sie bei der weiteren praktischen Tätigkeit auszunutzen.

Kann man eine solche Maschine herstellen?

Offenbar kann man das. Zum einen sind bereits erfolgreiche Experimente durchgeführt worden, zum anderen widerspricht das Lernen von Maschinen keinem bekannten Naturgesetz, insbesondere auch nicht dem Satz, dass Information nicht aus dem Nichts gewonnen werden kann. Das Lernen geht stets auf Kosten eines Informationspotentials vor sich: Der Schüler wird niemals mehr wissen als sein Lehrer, wenn er nur von ihm lernt und keine eigenen Forschungen und Experimente anstellt. Das Niveau seiner Kenntnisse bleibt dann sogar stets - wenn auch nur wenig - niedriger als das seines Lehrers.

Wie aber kann man die Anforderungen an eine lernende Maschine mathematisch formulieren? Wie muss sie aufgebaut sein?

Wie alle informationsverarbeitenden Systeme muss sie einen Eingang für Information haben, etwa eine Tastatur, außerdem einen Ausgang - irgendeine Schreibeinrichtung - und ein umfangreiches Gedächtnis, in dem die verschiedenen Informationen in einer für die Verarbeitung geeigneten Form gespeichert werden. Bei diesem Speicher handle es sich etwa um einen langen Papierstreifen.

Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass alle Informationen, die die Maschine erhält, durch diskrete Signale, etwa durch Folgen von Nullen und Einsen, kodiert sind und dass auch im Ausgang derartige Folgen erzeugt werden. Bekanntlich hängt die Informationsmenge, die von einer Folge von Signalwerten (einer Zeichenkombination) geliefert wird, von der Wahrscheinlichkeit dieser Zeichenkombination ab.

Praktisch wird man jedoch immer mit relativen Häufigkeiten und nicht mit den eigentlichen



Wahrscheinlichkeiten zu tun haben. Daher kann man die Aufgabe der Maschine folgendermaßen formulieren:

Die Maschine soll Folgen von Zeichenkombinationen ausgeben, die sich von den eingegebenen Folgen unterscheiden, in denen aber die einzelnen Kombinationen mit der gleichen relativen Häufigkeit auftreten wie in der eingegebenen Folge.

Diese Aufgabe sieht etwas abstrakt aus, daher erläutern wir sie an Beispielen. Wir wählen zum Beispiel aus einem Setzkasten auf gut Glück 35 Buchstaben. Wozu wir auch den Zwischenraum (das Spatium) als "Leerbuchstaben" rechnen - und erhalten völlig "einwandfreien Unsinn":

razwklss tkavgbi yänbrdegöizlcxgkes.

Ein ähnliches Resultat ergibt sich, wenn man alle Buchstaben des Alphabets auf gleiche Zettel schreibt, die Zettel in einen Beutel schüttet und mischt, "auf gut Glück" einen Zettel herausnimmt, den Buchstaben von ihm abschreibt, den Zettel wieder hineinwirft und so fortfährt.

Es muss betont werden, dass man bei einer Wiederholung des Versuchs praktisch nie die gleiche Kombination erhält, die hier angeführt worden ist. Jede andere Kombination, die man auf die gleiche Art erhält, hat aber die gleiche statistische Qualität, nämlich die gleiche Wahrscheinlichkeit wie die angegebene.

Verschafft man sich aber etwas Sinnloses, indem man auf gut Glück Buchstaben aus dem erstbesten Buch ausschreibt, so wird das Ergebnis weit "schlechter". Der Buchstabe „e“ tritt in deutschen Texten etwa 100 mal so oft auf wie der Buchstabe „x“, und der Buchstabe „r“ halb so oft wie „e“. Es ist klar, dass in dem Muster, das sich ergibt, „r“, „e“ und „x“ nicht gleich oft auftreten werden. Diese Abhängigkeit wird z. B. bei der Herstellung von Lettern berücksichtigt.

Das Muster

unr vma eriiniu bl e innduelwe shu,

das dadurch entstanden ist, dass ein Lineal quer zu den Zeilen einer Zeitung gelegt wurde, enthält weder q noch x, aber dafür e und n viermal.

Der Zwischenraum zwischen den Wörtern der Leerbuchstaben tritt noch etwas häufiger auf als alle anderen Buchstaben.

Liegt ein Sinn in dem erhaltenen Muster?

Jeder wird "nein" sagen. Wir sind jedoch vorsichtig, da wir vorläufig nicht wissen, was "Sinn" überhaupt ist. Wir sagen es genauer: Das Muster spiegelt in gewissem Umfang die Häufigkeit der einzelnen Buchstaben in deutschsprachigen Texten wider. Die deutsche Sprache (und allgemein jede Schriftsprache) wird aber noch durch weitere Häufigkeiten gekennzeichnet.

Unter Berücksichtigung der relativen Häufigkeiten, mit denen dreibuchstabige Kombinationen in russischen Texten auftreten, erhielt der Moskauer Mathematiker R. Dobrushin die Folge:

**покак пот дурноскака наконецно зне стволонил се твой обниль,**

bei der Berücksichtigung vierbuchstabiger Kombinationen ergab sich zum Beispiel:

**весель браться не сухой и непо и корко.**

Jeder kann, wenn er will, ähnliche Zeichenfolgen selbst ohne eine Maschine aus einer beliebigen Sprache ableiten. Dazu muss man irgendeinen Text in dieser Sprache nehmen und auf gut Glück

drei oder vier Buchstaben wählen. Dann streicht man den ersten Buchstaben der Gruppe und schreibt ihn für sich auf; als nächstes sucht man eine Stelle, an der man den Rest findet, und fügt zu diesem den nächsten Buchstaben hinzu, auf den man stößt, und lässt den ersten fort. Das' wiederholt man mehrere Male. Aus den Proben

... gestiefelte ... **Tiefe** ... **Lieferant** ... **Schwefel** ... **Zweifel** ... viel- ... einmal-an ... -andere ... **Andenken** ... **indem** ... **dem** ... **dem-** ... einem-**Wunder** ... -**Wunder** ... **gewunden** ... **Hintergrund** ... **blind-** ... **Land-erschaffen** ... ließ **er-liegen** ... **der-Leute** ... -**leise** ... **Leid** ... **schneiden** ... **scheiden** ... von **denen** ... **verschiedene** ...

ergibt sich beispielsweise die Folge:

stiefel - andem - wund - er - leidene.

Wie man sieht, ergeben sich dabei manchmal richtige Wörter der Sprache, aus der man die Folge abgeleitet hat. Die anderen Zeichenkombinationen sind Wörtern dieser Sprache ähnlich. Sie lassen sich leicht aussprechen und können von jemandem, der die betreffende Sprache nicht versteht, nicht von den sinnvollen Wörtern dieser Sprache unterschieden werden - sie spiegeln augenscheinlich eine bestimmte Etappe jedes "natürlichen" Erlernens einer Sprache wider.

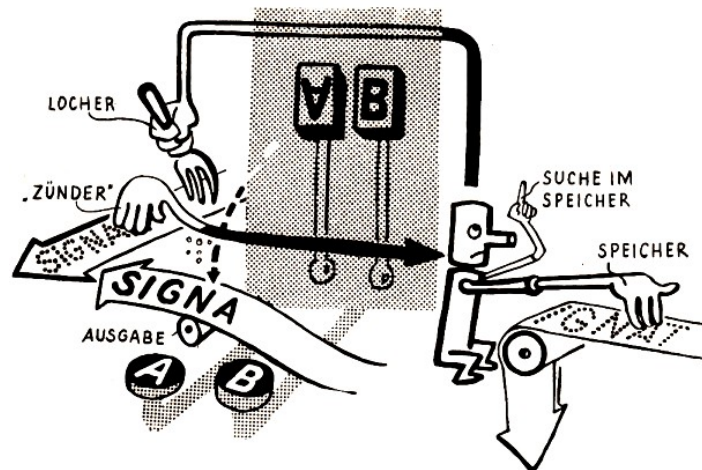


Bild 14.2.: Eine einfache stochastische Maschine, die statistische Zeichenfolgen erzeugt. Der Speicher hat die Form eines Bandes, in das das zugrunde gelegte Material eingelocht ist. Auf einem zweiten Band ist eine Anfangskombination als "Zünder" vorgegeben. Die Maschine sucht im Speicher, bis sie diese Kombination findet, fügt den im Speicher als nächsten folgenden Buchstaben dazu, lässt den ersten weg und beginnt mit der neuen Kombination wiederum den Suchprozess. Die erzeugte Folge wird auf ein Band gedruckt ausgegeben. Die Tastatur dient zum Eingehen des "Zünders".

So behielt der Verfasser dieses Buches bei einem kurzen Aufenthalt in China nicht ein einziges chinesisches Wort, aber er lernte unwillkürlich, die gutturale und abgehackte Art der chinesischen Sprache so nachzuahmen, dass Menschen, die die chinesische Sprache nicht kannten, annehmen mussten, er beherrsche sie vollständig. So lernen die Kinder die Muttersprache; sie können in kein Wörterbuch sehen und nicht in die Grammatik eindringen, sie eignen sich die Statistik der Sprache an und nicht die Sprachalgorithmen, die in Lehrbüchern stehen.

Allerdings gelingt es im allgemeinen nicht, einen Sinn in den "Sätzen" zu entdecken, die man auf diese Weise konstruiert. Arbeitet man aber mit längeren Kombinationen, also Folgen aus fünf, sechs oder mehr Buchstaben, so wird der Suchprozess sehr langwierig.



"verkehrt Haus" trifft man ohne Punkt dazwischen fast niemals.

Die Statistik von Kombinationen aus zwei oder drei Wörtern enthält schon einen Teil des Sinns der Wörter. So wird in einsprachigen Wörterbüchern ein dem Leser unklares Wort vielfach dadurch "erklärt", dass man einfach angibt, mit welchen anderen Wörtern es gewöhnlich benutzt wird. In Texten, die der Verfasser auf die angegebene Weise maschinell und manuell erzeugt hat, entsprechen nicht nur die Wortformen der russischen Grammatik, was allein schon interessant ist, sondern es entstanden auch sinnvolle Sätze. So ergab sich bei einer statistischen Auswahl aus einem Psychologiebuch der folgende "fließende Satz":

"Das Abstrakte ist die Erscheinung, die durch die logische Charakterisierung gegeben wird."

Einen unerwarteten Effekt erzielte der Verfasser, als er diesen Satz einigen Fachleuten mit der Frage vorlegte: "Wie beurteilen sie diese Definition?" Die Psychologen widmen der Beurteilung aus und fragten ihrerseits: "Wer hat das gesagt?"

Bei einer Bearbeitung der Volksmärchensammlung "Iwan der Kleine - groß durch den Verstand" entstand die Wortfolge:

"Es war einmal ein Zar. Der alte Zar lebte mit der Zarin. Und der Zar gab zu raten auf, er fragt das Pferd: 'Ein steinerner Berg?' blieb stehen. Und die beiden Alten trauerten ..."

Die Satzzeichen sind hier dem Sinn entsprechend gesetzt. Daraus geht folgendes hervor: Gibt man der Maschine einen Anfang - die ersten Wörter des Werks, die man als Überschrift oder Thema auffassen kann -, so erhält man von ihr mehr oder weniger sinnvolle Variationen, und zwar entfernen sich diese - wie bei einem schlechten Redner - um so mehr vom Thema, je länger sie sind. Die Ähnlichkeit des Verhaltens unserer Maschine mit dem eines schlechten Redners wird auch dadurch unterstrichen, dass sie selbst ohne einen Eingriff von außen nicht aufhören kann. Wie in der Musik nimmt sie auch in ihrem "literarischen Schaffen" bei Mangel an Material für eigene Konstruktionen und bei einer großen "Disziplin" ziemlich oft rettende Zitate zu Hilfe und fügt diese geschickt aneinander.

Dieses Verhalten der Maschine ist dem einiger dunkler Erscheinungen auf schriftstellerischem und musikalischem Gebiet ähnlich. Es muss noch einmal betont werden, dass es in der Maschine kein "Programm des Nachschöpfens" gibt; sie hat nicht einmal ein Programm für ein echtes literarisches oder musikalisches Schaffen, da niemand richtig weiß, in welche elementaren Operationen sich diese Arbeit zerlegen lässt.

Niemand hat bewusst versucht, Methoden des maschinellen Schaffens zu entwickeln, man hielt diese entweder für vollkommen unrealisierbar oder für sehr kompliziert. Die Theoretiker beschäftigten sich mit Notenheften und Gedichtbänden nur, um die Größe der Entropie auszurechnen, und waren selbst erstaunt, als das Experiment zeigte, dass Konstruktionen mit der gleichen Entropie unter bestimmten Bedingungen wie Nachahmungen aussehen.

Die Maschine war zum Plagiator geworden, bevor jemand erraten konnte, wie sie zu dieser Sünde kam. Zuerst wurde festgestellt, dass sie Melodien und Zeilen stiehlt, und dann erst verstand man, dass sie das aus Armut tut und dass es nötig ist, entweder ihre "Disziplin" zu erniedrigen oder die ihr verfügbare Informationsmenge - sozusagen ihre "Gelehrsamkeit" - zu vergrößern.

Eine der geistigen Operationen, die der Analyse am zugänglichsten sind, ist das Spiel. Kann eine stochastische Maschine lernen, Dame, Domino oder Schach zu spielen? Wird sie die Regeln einhalten und danach streben, zu gewinnen?

Ja natürlich, wenn man in ihr Gedächtnis Aufzeichnungen verschiedener Varianten überträgt, die schon irgendwann einmal ohne Verletzung der Regeln gespielt worden sind. Außerdem muss die Maschine so geschaltet sein, dass sie die bei ihr einlaufenden Nachrichten über die Spielsituation und den Zug des Partners mit Situationen und Zügen in den ihr bekannten Partien vergleicht und ihre Züge unter den Zügen aussucht, die in der gleichen Situation zum Erfolg geführt haben.

Eine weitere Komplizierung der Schaltung, die die Maschine befähigt, an den "richtigen" Stellen Pausen zu machen und den Tonfall - z. B. bei Frage und Antwort - zu berücksichtigen, erweitert die Möglichkeiten der Maschine bedeutend. Übertragen wir jetzt Stenogramme gewöhnlicher Gespräche, die irgendwo geführt wurden, in die Maschine, so können wir uns selbst mit der Maschine in der Art unterhalten, in der gewöhnlich Gespräche "über nichts" geführt werden. Das Ausgangstenogramm wird ungefähr folgende Form haben:

Guten Tag! - Guten Tag! Wie geht's? - Ach, danke, und dir? - Gut. Was gibt's Neues? - Nichts Besonderes, und bei dir? - Alles noch beim alten. - Na ja.

Und wenn Sie die Maschine mit "Guten Tag!" begrüßen, so findet sie diese Worte im Gedächtnis und spricht die darauf folgenden aus: "Guten Tag! Wie geht's?" Es ist traurig, aber mit solchem Hin und Her von Worten vergeuden wir Menschen viel Zeit.

Enthält das Gedächtnis der Maschine einen beliebigen, aber hinreichend langen fremdsprachigen Text, bei dem hinter jedem Wort die deutsche Übersetzung steht, so kann sie auch völlig andere Texte aus dieser Sprache in die deutsche übersetzen, wenn auch im allgemeinen nicht besonders flüssig und fehlerlos. Und doch hat man beim Bau dieser Maschine weder an Musik noch an Aufsätze oder an Übersetzungen gedacht. Es handelt sich einfach um einen Apparat zur Erzeugung von Zeichenreihen, die bestimmten Einschränkungen unterliegen. Insbesondere ist die Statistik der Zeichenreihen durch das eingegebene Material bestimmt.

Leider ist aber die Qualität ihrer literarischen Tätigkeit noch in starkem Maße verbesserungsbedürftig.

Die "Definition des Abstrakten" könnte vielleicht noch im Text einer dicken Dissertation mit durchgehen, aber das "Märchen" ist ein glatter Reinfall. Woran liegt das?

Bei einer genauen Betrachtung stellen wir fest, dass Kombinationen von zwei oder drei Wörtern zu kurz sind. Die Maschine liefert "kurze Gedanken". Es wird ohne weiteren Plan Wort an Wort gereiht.

Als der Verfasser seine Muster erzeugt hatte, erinnerte er sich, solche Texte schon in Lehrbüchern der Psychiatrie gelesen zu haben, in denen Aufzeichnungen der Auslassungen von Geistesgestörten angeführt werden. Bei Geisteskranken zeigt sich ebenfalls ein einfaches "Aneinanderreihen" von Wortgruppen, zum Beispiel bei der manischen Sprachverwirrung:

... Es war Zeit, er war Dekan. Ich frage ihn, was tun? Das schrieb Tschernyschewski. Keine Sekunde Zeit verlieren, in einer Sekunde verlässt das Fließband soviel, wieviel die Produktion weiß ... Ich bin die Fürstin Maria Alexandrowna aus Gribojedows "Verstand schafft Leiden". Daher ist Tschazki arm.<sup>59</sup>

Besonders interessant ist dabei, dass wir durch eine einfache Änderung der "Disziplin", nämlich durch eine Verkürzung der Zeichenkombinationen, mit denen die Maschine arbeitet, diese veranlassen, einen immer ernsteren geistigen Schaden oder Rausch zu simulieren. Die Wort-

---

<sup>59</sup>J. Slutschewski: Psychiatrie. Moskau 1961

kombinationen werden immer unzusammenhängender, und Schließlich bringt sie, wie man so sagt, nicht einmal mehr "Papa und Mama" heraus, sondern verliert sich in sinnlosen Silben. Dieses Stadium der Geistesgestörtheit nennt man in der Psychiatrie Chorea. Einen solchen Prozess hat Gogol mit fast medizinischer Genauigkeit in seinen "Aufzeichnungen eines Wahnsinnigen" dargestellt; hier sind einige Angaben aus dem Tagebuch des Poprischtschin:

Oktober 3 ...

Jahr 2000 April 43. Tag

Märzember 86. Tag. Zwischen Tag und Nacht.

Madrid. Februarer dreißigster ...

Za 34 hl MZ Jhra raurbeF 349.

Es ist durchaus möglich, dass Versuche mit stochastischen Maschinen den Ärzten zu einem besseren Verständnis der Vorgänge bei psychischen Störungen verhelfen und eine bessere Heilung dieser Störungen möglich machen werden.

Auf einer Tagung in Warschau wurde im September 1961 von neuen Erfolgen auf dem Gebiet der maschinellen Verarbeitung von Wortmaterial berichtet. Einem französischen Philologen gelang es, einige verlorengegangene Stellen aus fünfzehnhundert Jahre alten Handschriften des katholischen Heiligen Augustinus zu rekonstruieren.

Der polnische Philologe A. Bartkowiak stellte die Verfasser einiger anonymer literarischer Werke fest. In beiden Fällen erhielt die Maschine verschlüsseltes literarisches Material und bestimmte dessen statistische Merkmale. Dann verglich sie diese Merkmale mit den bekannten Merkmalen der Werke verschiedener Schriftsteller bzw. bildete selbständig Wortkombinationen zur Ausfüllung der Lücken und sorgte dabei dafür, dass sich diese in ihrer Statistik nicht von den gegebenen Texten unterscheiden.

Schon früher hatte der amerikanische Philologe McDonough auf einer Maschine den gesamten Text der "Ilias" - 15693 Zeilen - verarbeitet und festgestellt, dass die Statistik des Textes im allgemeinen konstant ist. Folglich wurde das ganze Epos von einem Menschen geschrieben. So liefert die Maschine ihren Beitrag zu dem alten Streit um Homer.

Die Erzeugung von irrer Phantasie oder Parodien auf schlechte, stümperhafte schöpferische Produkte würde aber wohl kaum jemand veranlassen, Zeit und Mittel für die Schaffung von stochastischen Maschinen zu opfern. Wesentlich ist die Frage: Kann eine solche Maschine den Menschen im Produktionsprozess ersetzen, kann sie für den Menschen zwischen Zeiger und Knopf am Steuerpult stehen?

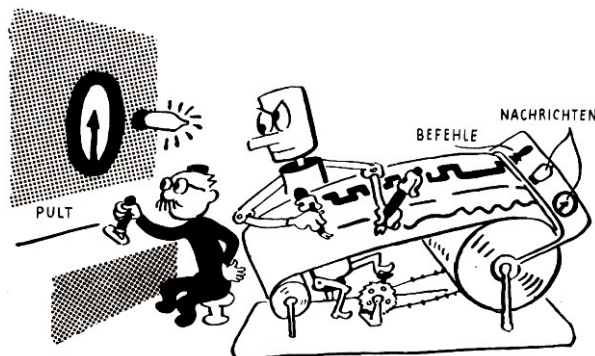
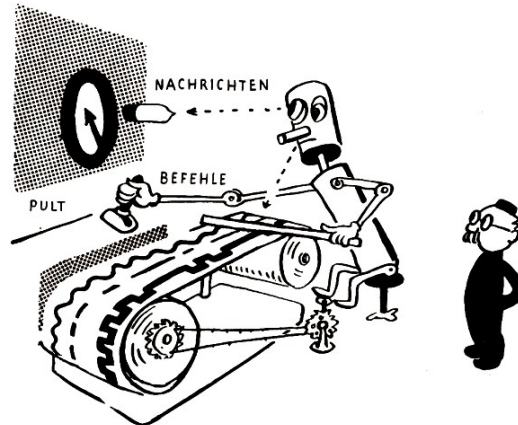


Bild 14.4.: Eine stochastische Maschine, die den bedienenden Menschen an einer Maschine ersetzen soll, beobachtet für eine gewisse Zeit einen guten Operator und speichert dessen Verhalten in den verschiedensten auftretenden Situationen. Später findet sie an Hand ihrer "Aufzeichnungen" die in der jeweiligen Situation richtige Einstellung der Steuerhebel.

Das ist durchaus möglich. Lassen wir die Stellungen aller Anzeigergeräte am Steuerpult automatisch aufzeichnen, so erhalten wir eine Schar von Kurven. Eben solche Kurven erhält man, wenn man die Bewegungen der Steuerhebel aufzeichnen lässt, mit denen der Operateur der Maschine seine Befehle erteilt. Diese Kurven - das Protokoll des Regelungsprozesses - werden kodiert, in die Maschine eingegeben und im Gedächtnis gespeichert.

Nachdem die Maschine den Operateur auf diese Weise hinreichend lange beobachtet hat (wobei es natürlich günstig ist, wenn in dieser "Lehrzeit" möglichst alle typischen Situationen aufgetreten sind, die bei der Bedienung des zu regelnden Systems vorkommen), wird sie (mit entsprechenden Signalwandlern zur Aufnahme der Informationen und Ausführung der notwendigen Aktionen versehen) an die Stelle des Operateurs gesetzt.



Sie nimmt alle Nachrichten, die am Steuerpult einlaufen, auf, zeichnet entsprechende Kurven und sucht unter den im Gedächtnis aufbewahrten Kurven solche heraus, die mit diesen Kurven übereinstimmen. Dann werden die zugehörigen Bewegungen der Steuerhebel von der Maschine gelesen und ausgegeben, d. h., die Steuerhebel am Pult werden ebenso eingestellt. Diese Einstellungen sind in der Situation, die die Geräte anzeigen, zweckmäßig, wenn der Operateur, bei dem die Maschine diese Reaktionen beobachtet hat, zweckmäßig gehandelt hat, mit anderen Worten, wenn die Maschine an der Arbeit eines guten Operateurs gelernt hat.

Sind das Gedächtnisvolumen und die Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine hinreichend groß, so bringt ihre Unterrichtung keine zusätzlichen Pflichten für den Operateur mit sich, denn er "programmiert" die Maschine nicht - er arbeitet genauso, wie wenn die Maschine gar nicht vorhanden wäre.

Es ist bemerkenswert, dass die Maschine bei einer Erhöhung der Disziplin die Dynamik der Situationen erkennt und berücksichtigt. Steht nämlich der Zeiger eines Geräts auf dem Teilstrich 5, und gibt es im Gedächtnis ein Beispiel, bei dem dieser Zeiger auch auf 5 stand, so heißt das noch nicht, dass die Situationen gleich sind.

Es kann wesentlich sein, wie der Zeiger diesen Teilstrich erreicht hat: von 4 oder von 6 her. Im ersten Fall wächst der betreffende Parameter, und das System muss auf eine Art gesteuert werden. Im zweiten Fall fällt der Parameter, und das System muss in anderer Weise beeinflusst werden. Wenn die Disziplin so groß ist, dass mehrere aufeinanderfolgende Messwerte, die dasselbe Gerät anzeigt, von der Maschine berücksichtigt werden, so wird die vorliegende Situation nur dann mit einer früher beobachteten identifiziert, wenn sie sich von dieser auch in ihrer Dynamik nicht unterscheidet.

Hieraus wird klar, wie sich eine stochastische Steuermaschine in einer Situation verhält, die sie noch nicht kennt. Ist die Disziplin der Maschine groß, so wird sie immer wieder den gesamten

Inhalt des Gedächtnisses durchsuchen, diese Situation aber nicht finden und daher gar nichts tun. Wenn man aber die Disziplin verringert (das kann durch eine Rückkopplung automatisch geschehen), so beginnt die Maschine gewissermaßen "auf gut Glück" zu handeln - sie sucht im Gedächtnis nach Situationen, die mit der vorliegenden wenigstens in einigen Zügen übereinstimmen, und verfährt "analog". Die Analogie ist zwar mehr oder weniger ungenau, diese Handlungsweise hat aber doch mehr Berechtigung als eine rein zufällige.

Die Maschine tut praktisch das gleiche, was Juristen tun müssen, wenn sie für einen Fall keine Richtlinie - kein Gesetz - haben. Sie suchen dann Zuflucht zu einem "Präzedenzfall", d. h., sie orientieren sich an einer Entscheidung, die schon einmal in einem gleichartigen Fall gefällt worden ist (und an deren Begründung).

Das englische Recht gründet sich größtenteils auf Präzedenzfälle. Der Analogieschluss ist allerdings aus der Rechtsprechung aller demokratischen Staaten ausgeschlossen. Ein Gesetz ist im Grunde genommen eine - vollständige oder unvollständige - Information für den Richter, wie er sich in einer genau umrissenen Klasse von Situationen, den Tatbeständen, zu verhalten hat. Die eventuell auftretende Unvollständigkeit der Information legt es in das Ermessen des Gerichts, "mildernde" oder "erschwerende" Umstände anzuerkennen, und zeigt sich in einer Unbestimmtheit "von-bis" im Strafmaß.

Dieses Beispiel zeigt überraschenderweise, dass unsere stochastische Maschine als Rechtsberater und als unparteiischer Richter arbeiten kann. Das Symbol der Justiz - die Themis mit den verbundenen Augen - ist hier vollkommen verwirklicht, da die Maschine ohne spezielle Maßnahmen von Seiten der Menschen, die sich ihrer bedienen, zur Parteilichkeit offenbar nicht fähig ist. Bei entsprechend großer Speicherkapazität und Arbeitsgeschwindigkeit übertrifft sie jeden Menschen, jeden Kenner der Gesetze, der Gerichtspraxis und aller Varianten der Delikte und Strafen.

Man hört zuweilen die Meinung, man dürfe das Schicksal von Menschen nicht einer verantwortungslosen Maschine anvertrauen, indem man dieser die Ausarbeitung von juristischen Entscheidungen oder die Diagnose von Krankheiten überlässt.

Offenbar wäre es zuverlässiger, eine so verantwortungsvolle Angelegenheit determinierten Maschinen vom Typ der oben beschriebenen elektronischen Rechenmaschinen anzuvertrauen, in denen eine scharfe Kontrolle den Einfluss des Eigenrauschens beseitigt, ehe er sich auf die Ergebnisse der Maschine auswirken kann.

Die stochastischen Maschinen sind natürlich weniger zuverlässig, entweder weil sie wie der Homöostat von Ashby eine innere Rauschquelle haben oder weil Rauschen als Bestandteil einer unvollständigen Information in sie eingegeben wird.

Jede stochastische Maschine artet aber bei einer hohen Disziplin in eine determinierte aus, und ihre Zuverlässigkeit ist durch das Verhältnis ihrer Disziplin zur Informationsmenge, über die sie verfügt, bestimmt. Andererseits kann man kaum sicher sein, dass ein solches durch und durch stochastisches Signalsystem wie ein heutiger Richter vollkommen zuverlässig ist.

Übersteigt seine Disziplin seine Kenntnisse, so verhält er sich wie ein streng determinierter Automat und verwendet schablonenhaft die ihm vorgeschriebenen Entscheidungen. Ist die Disziplin des Richters gering, so werden seine Entscheidungen willkürlich, regellos sein, und letzten Endes wird er die grundlegende Auswahl "schuldig - nicht schuldig" zufällig treffen.

In der Gesellschaft gibt es eine Kontrolle, die solche Extreme verhindert, und diese ist natürlich auf maschinelle Entscheidungen ebenso anwendbar.

Unmittelbar an die juristische Tätigkeit grenzt die kriminalistische. Nicht ohne Grund gilt der



Detektiv Sherlock Holmes als Muster eines sehr hohen, für andere Menschen nicht erreichbaren Scharfsinns: Das Aufdecken von Einzelheiten vergangener Ereignisse an Hand geringfügiger Hinweise, die der Verbrecher zu verbergen und zu entstellen sucht, ist tatsächlich eine sehr knifflige und schwierige Arbeit. Kann eine stochastische Maschine diese Arbeit ohne weiteres durchführen?

Im Prinzip kann sie das natürlich. Einen Sherlock Holmes gibt es einmal alle hundert Jahre oder vielleicht überhaupt nie. Die Grundlage für die Arbeit der Untersuchungsorgane ist (in erster Näherung) genau das, was die Maschine leistet: das Sammeln der "Handschriften" von Verbrechern und das Identifizieren der "Handschrift" bei einem vorliegenden Verbrechen.

Jeder Räuber, Einbrecher oder Gauner wählt Art und Ausführung seiner Verbrechen seinen Fähigkeiten und vielfach auch den Traditionen entsprechend, die ihm derjenige überliefert hat, der ihn in die Verbrecherwelt hineingezogen hat. Er wechselt die Art seiner Verbrechen und seine "Handschrift" selten.

Haben die Untersuchungsorgane eine Reihe von Beschreibungen der Tatorte und näheren Umstände einiger Verbrechen, die in der gleichen Art und Weise ausgeführt wurden, so kann die Maschine feststellen, ob in allen diesen Fällen dieselbe Bande oder derselbe Mensch "gearbeitet" hat, und, wenn das der Fall ist, an Hand von alten, bereits aufgeklärten "Fällen", die das "Gedächtnis" aufbewahrt, genauere Angaben über die Verbrecher machen, z. B. ihre "Spitznamen", ihre richtigen Namen, Gewohnheiten, Angaben über Bekannte und Verwandte, usw. Es ist klar, dass solche Informationen dazu beitragen, die Verbrecher zu erwischen und unschädlich zu machen.

Die Grundlage für die erfolgreiche Arbeit einer stochastischen Maschine ist also die Kontinuität aller Prozesse, die den Menschen umgeben und interessieren. Das, was geschieht, ist ähnlich bereits früher geschehen, und wenn es auch nicht ganz genauso geschehen ist, so kann man das doch meistens vernachlässigen. Eine stochastische Maschine erzeugt keine neue Information. Sie stellt im Grunde genommen nur einen gigantischen Speicher dar, aus dessen Inhalt zufällige Kombinationen erzeugt und weiterverarbeitet werden.

Aber kehren wir zurück zu Cossas Einschränkungen.

Die dritte Einschränkung (nach Cossas Zählung die fünfte) besteht darin, dass eine Maschine "nicht erfinden kann". Der Mathematiker F. Rotstein bemerkte dazu:

"Man kann der Maschine schöpferische Fähigkeiten nicht absprechen, solange man nicht sagen kann, was man ihr damit abspricht."

Eine Erfindung erscheint einem unaufmerksamen Beobachter wie eine Verletzung des Prinzips, dass Information nicht aus dem Nichts entstehen kann: Es war keine Maschine da, der Mensch saß, rauchte, grübelte im stillen Kämmerlein und hatte plötzlich eine neue, fruchtbringende, äußerst nützliche Idee, die siegreich in die Praxis eingeht, Umwälzungen herbeiführt, Nutzen bringt usw.

Einen Teil meines Lebens habe ich als Gutachter für Erfindungen im Patentamt verbracht, daher halte ich es für möglich, diese von begeisterten Biografen erzeugte primitive Vorstellung zu widerlegen.

Jede Erfindung beginnt genau genommen mit einer Undiszipliniertheit im Denken des Erfinders: Entweder zieht der Mensch eine Schlussfolgerung, die sich aus einer Verallgemeinerung der Kenntnisse, die auf dem gegebenen Gebiet gesammelt wurden, gar nicht ergibt, oder er geht von Gründen aus, die mit der Sache überhaupt nichts zu tun haben.

Je weniger folgerichtig der Erfinder ist, desto größer ist die Reichweite seiner erfinderischen

Ideen und um so geringer die Wahrscheinlichkeit, dass seine Idee nützlich ist. Daher enthält jede erdingerische Idee zunächst weniger Information als ihre Voraussetzungen: Sie ist durch Rauschen verwässert, sie enthält mehr Zufälligkeiten, mehr Unbestimmtheit als die Voraussetzungen.

Eine einfache stochastische Maschine ist zu solchen Erfindungen durchaus in der Lage: Sie "erfindet" doch Melodien und "definiert das Abstrakte", obwohl sich weder das eine noch das andere durch einen Algorithmus aus dem Ausgangsmaterial ergibt.

Nachdem eine Idee entstanden ist, beginnt der Ausleseprozess. Ein erfahrener Erfinder weiß, dass die von ihm gewählte Idee um so fruchtbringender ist, je mehr andere Ideen er auf dem Wege zu ihr verworfen hat. Der Kampf der Ideen ist gerade das Wesen des Erfindens, in diesem Kampf wird das Neue geschaffen. Der Erfinder erprobt, prüft und verbessert seine Vorstellungen von der zukünftigen Erfindung an einem konkreten oder abstrakten Modell der für seine Erfindung bedeutsamen Naturgesetze und vergrößert dabei die Informationsmenge, über die er verfügt, auf Kosten der Information des Modells.

Die Auslese wird auch bei der Prüfung der Patentanmeldung und bei der Einführung einer akzeptierten Erfindung fortgesetzt; handelt es sich um eine Maschine, so geschieht das auch noch bei ihrer weiteren Erprobung in der Produktion.

Dieser Prozess kann, wie sich erraten lässt, ebenfalls von stochastischen Maschinen ausgeführt werden. Kein Mensch und keine realen Maschinen können jedoch im voraus alles berücksichtigen, was erst der Versuch, was erst die Praxis zeigt. Die Anwendung einer Erfindung in der Praxis führt manchmal zu völlig unerwarteten Ergebnissen, d. h. zum Auffinden von Informationen, die sich in die Informationsmenge einordnen, die nun in der Erfindung enthalten ist.

Eine Maschine ist also unbedingt fähig, Erfindungen zu machen, und wenn ihre Fähigkeit, neue Ideen zu liefern, durch eine Verringerung der Disziplin leicht erhöht werden kann, so kann das wirkliche Erfinden, die Fähigkeit, nicht nur neue, sondern auch vernünftige Ideen zu liefern, realisiert werden, indem man in der Maschine ein abstraktes Modell der Zusammenhänge speichert, die für das betreffende Gebiet wesentlich sind, und die Maschine befähigt, mit diesem Modell zu arbeiten, d. h. logische Schlussfolgerungen zu ziehen. Man muss der Maschine also eine Vielzahl von Informationen zur Verfügung stellen, die sich direkt auf das gegebene Thema beziehen.

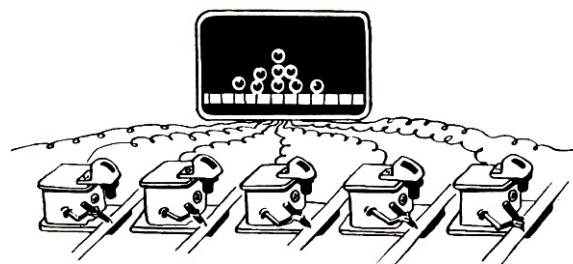


Bild 14.5.: Eine Reihe fehlerhaft funktionierender Turing-Maschinen liefert kein einheitliches Resultat, sondern eine Reihe von Resultaten, von denen dasjenige, das von den meisten Maschinen errechnet worden ist, mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit das richtige ist.

"Eine Maschine kann keine kritische Funktion ausüben", behauptet Cossa in der vierten (bei ihm in der dritten) Einschränkung, und er hat dabei natürlich das Problem der Kontrolle im Auge. Der Leser weiß aber bereits, dass die einzige Maschine, die keine redundanten Vergleiche durchführt, die nicht dem Einfluss des Rauschens unterliegt und gegen diesen nicht geschützt wird, die ideale Turing-Maschine ist.

Jede reale Maschine arbeitet bis zu einem bestimmten Grad zufällig, und die Kontrolle ist gewöhnlich darauf ausgerichtet, diesen Grad möglichst niedrig zu halten.

Kein Automat kann ohne Kontrolle arbeiten, es sei denn in einer mathematischen Idealwelt wie die Turing-Maschine. Ist die eigene Kontrolle des Automaten unzureichend, so muss er ständig von einem Menschen, einem Kontrolleur, beaufsichtigt werden. Das empfinden wir als unbefriedigend. Es tut uns leid um die Zeit dieses Menschen.

Eine automatische Kontrolle kann durch Schaltungen verschiedenster Arten realisiert sein, charakteristisch bleibt eins: Sie wirkt dem Wachstum der Entropie entgegen und gründet sich auf die Redundanz.

Die Kritik beginnt wie jede Kontrolle mit der Feststellung einer Nichtübereinstimmung. Eine determinierte Maschine, die eine Nichtübereinstimmung feststellt, muss die Arbeit unterbrechen und die Operationen, die zu dieser Nichtübereinstimmung geführt haben, wiederholen. Wenn eine stochastische Maschine auf eine Nichtübereinstimmung eines ihrer Ergebnisse (etwa  $2 \cdot 2 = 5$ ) mit einem Ergebnis stößt ( $2 \cdot 2 = 4$ ), das sich aus den in sie eingespeicherten Informationen (den Rechenregeln) ergibt, so wird sie sich entweder wie eine determinierte Maschine verhalten, also ihr Ergebnis verwerfen und von vorn beginnen, oder ihr Ergebnis als wenig wahrscheinlich ablehnen und fortfahren.

Was geschieht, hängt vom Kontrollsystem ab. Wesentlich für die Kritikfähigkeit einer stochastischen Maschine sind also die Informationen, über die sie verfügt. Eine Maschine, die in einem System arbeitet, für das der Ausdruck  $2 \cdot 2 = 5$  wahr ist, kann sich diesem gegenüber niemals kritisch verhalten, ebenso wenig wie ein im Dualsystem arbeitender Rechenautomat den Ausdruck  $1 + 1 = 10$  kritisieren kann, der im Dualsystem, wie wir uns überzeugt haben, richtig ist, obwohl ein Mensch, der nur das Dezimalsystem kennt, ihn für falsch halten würde.

Die formale Logik hilft uns bei der eigentlichen Kontrolle nicht. Aus den Gesetzen der Logik folgt weder, dass  $2 \cdot 2 = 4$  wahr ist, noch, dass  $2 \cdot 2 = 5$  wahr ist.

Die Gesetze der Logik gelten - wie wir gesehen haben - in allen denkbaren Bereichen, nicht nur in denen, die in der Praxis realisiert sind, obwohl es uns gerade auf diese besonders ankommt. Es ist zwar ein logisches Gesetz, dass die Negation einer Aussage falsch ist, Wenn die Aussage selbst wahr ist, dass also "nicht  $2 \cdot 2 = 4$ " falsch ist, wenn " $2 \cdot 2 = 4$ " wahr ist, aber die Logik sagt uns nichts darüber, ob die Aussage  $2 \cdot 2 = 4$  wahr ist.

Ebenso gilt ja auch: Wenn die Aussage  $2 \cdot 2 = 5$  wahr ist, dann ist die Aussage "nicht  $2 \cdot 2 = 5$ " (wovon " $2 \cdot 2 = 4$ " ein Spezialfall ist) falsch. Die Kenntnis darüber, ob die Aussage  $2 \cdot 2 = 4$  wahr ist oder nicht, können wir uns nur aus der Praxis verschaffen oder durch logische Umformungen aus der Praxis abstrahierter Aussagen.

Es ist ein gewisser Nachteil der determinierten Maschinen, dass man ihnen alle Informationen, die sie für ihre Arbeit brauchen, fehlerlos und in möglichst gehaltvoller Form zur Verfügung stellen muss. Gerade die Möglichkeit, stochastische Maschinen in unmittelbarem Kontakt mit der Realität arbeiten zu lassen, in der die Informationen unvollständig, unklar, durch Rauschen gestört sind, veranlasst uns zur Beschäftigung mit diesen Maschinen, obwohl wir von vornherein wissen, dass ihr Speichervolumen und ihre Arbeitsgeschwindigkeit weit größer sein müssen als bei determinierten Maschinen.

Die Fähigkeit zur Kritik stellt zweifellos eine starke Triebkraft in der geistigen Entwicklung der Menschheit dar. Man darf aber nicht vergessen, dass jeder einzelne Mensch einerseits ein sehr leichtgläubiges Wesen ist und andererseits eigensinnig auf seinen Irrtümern beharrt. Nur so sind viele der Streitigkeiten, die nicht selten in Feindschaften zwischen Gruppen und

Persönlichkeiten ausarteten, zu verstehen, von denen die Geschichte berichtet.

Die Gelehrten scherzen bitter: In der Wissenschaft wird eine neue Theorie erst dann akzeptiert, wenn die Verteidiger der alten aussterben. Die Fähigkeit des Menschen zur Kritik ist nicht einfach das Ergebnis eines bestimmten Gehirnaufbaus, sondern sie entwickelt und verstärkt sich im Prozess der gesellschaftlichen Entwicklung, im Prozess des Erkennens und Veränderns der Welt.

Die letzte Einschränkung von Paul Cossa lautet: "Eine Maschine kann nicht vom Konkreten zum Abstrakten übergehen." "Ein Kind beginnt seine Murmeln oder seine Spielgefährten zu zählen ...", erklärt Cossa.

"Sehr bald kommt es zum Abstrakten, die Zahl existiert selbständig für das Kind. - Etwas Ähnliches gibt es bei einer Maschine nicht."

Wir erwarten von dem Verfasser natürlich Beweise dafür, dass das Kind selbst, durch die Kraft seines Verstandes "sehr bald" das Dezimalsystem entdeckt und das abstrakte "selbständige" Wesen der Zahlen erkennt. Aber es gibt keine derartigen Beweise, und es liegt viel näher anzunehmen, dass das Kind einfach lernt, dass es von den Älteren die Regeln des Gebrauchs von Abstraktionen übernimmt, die in ihrer endgültigen Form vor vielen tausend Jahren entwickelt worden sind.

Offenbar wäre es für das Kind leichter, zuerst das Dualsystem oder das System zur Grundzahl 5 zu entdecken. Das geschieht aber niemals. Der Schriftsteller G. Gor erzählt, dass bei den Ureinwohnern von Sachalin, den Niwchen, bis in die jüngste Zeit getrennte Zahlwörter für runde und lange Gegenstände existierten, und die Niwchenkinder fanden den abstrakten Begriff der Zahl nicht nur nicht selbst, sondern sie verstanden auch zunächst nichts, als man ihnen diesen Begriff beibringen wollte.

Ich beabsichtige nicht, hier zu beweisen, dass auch Kinder nicht zum Abstrahieren fähig sind: Es existieren einfach Abstraktionen von verschiedenem Schwierigkeitsgrad; die einen kann jeder von uns selbständig ausführen, für die anderen sind die Überlegungen und Erfahrungen vieler Generationen erforderlich, von Generation zu Generation werden Begriffe überliefert, auf denen sich Abstraktionen immer höherer Stufe aufbauen.

Schwer zu beantworten ist folgende Frage, die sich jeder stellen kann: Wieviel neue abstrakte Begriffe habe ich in meinem Leben geschaffen?

Ein neuer Begriff hat ein manchmal neues Wort zur Folge, neue Wörter entstehen aber, wie Untersuchungen der Sprachforscher zeigen, sehr selten. In der Regel werden neue Abstraktionen, neue Begriffe mit bekannten Wörtern bezeichnet, denen auf diese Weise ein neuer Sinn gegeben wird. Dabei werden Analogien benutzt - man schuf den Begriff "elektrischer Strom" unter Berücksichtigung der Analogien des elektrischen Stroms mit fließendem Wasser.

Das Wort "Gas" erfand im 17. Jahrhundert der Physiker van Gelmont. Wir gewöhnlichen Menschen eignen uns offenbar zum größten Teil Abstraktionen und Zusammenhänge zwischen ihnen nur an, und das ist nicht dasselbe wie das Schaffen von Abstraktionen.

Und doch ist das Abstrahieren der wichtigste Prozess, der unbewusst im Gehirn aller Lebewesen, auch der einfachsten, vor sich geht. Dabei handelt es sich im allgemeinen natürlich nicht um solche Abstraktionen wie das "Integral", das "Axiom" oder das "Ereignis", aber die betreffenden Abstraktionen sind nicht weniger notwendig. Keine stochastische Maschine kann praktisch nutzbringend arbeiten, wenn sie nicht Abstraktionen schafft.

Wenn gesagt wird, die Maschine habe einen "genügend großen Speicher" und sie liefere "mit

der Zeit" eine gute Lösung, so fragt man sich sofort: Reichen alle im Lande vorhandenen Informationsspeicher einschließlich Bibliotheken usw. aus, und wann entdeckt die Maschine den Verbrecher, morgen oder nach hundertfünfzig Jahren, wenn sowohl der Verbrecher als auch der Geschädigte tot sind?

Solche für die Theorie unwesentlichen Fragen haben für die Praxis eine entscheidende Bedeutung. Behaupten wir, dass mit einer Vergrößerung des "Gedächtnis"inhalts der Maschine die Qualität ihrer Arbeit steigt, so müssen wir uns wieder fragen: Lohnt es sich, gigantische Speicher zu verwenden? In welchem Umfang verbessert sich das Endergebnis, wenn die verfügbare Informationsmenge vergrößert wird?

Betrachten wir zum Beispiel eine Bibliothek, die 100000 Bände in deutscher Sprache umfasst. Jeder Band enthalte etwa 2 Millionen Stellen, an denen Buchstaben (einschließlich des Leerbuchstabens, den wir im folgenden mit  $\odot$  bezeichnen wollen<sup>60</sup>) stehen. Ist der Speicher unserer Maschine durch ein Band realisiert, wie es Turing-Maschinen benutzen, bei dem jedes Feld (in dem also genau ein Buchstabe stehen kann) nur 2 mm breit ist, dann muss dieses Band 400000 km lang sein, um den Inhalt dieser Bibliothek aufnehmen zu können.

Einen solchen Streifen könnte man längs des Äquators zehnmal um die Erde wickeln!

Braucht die Maschine aber diesen ganzen Streifen? Das hängt natürlich von ihrer Aufgabe ab. Um z. B. zu den gleichen Ergebnissen in bezug auf die relative Häufigkeit der einzelnen Buchstaben zu kommen, genügt schon ein Band mit 10000 Feldern, dessen Länge also nur 20 m beträgt. Von diesen Feldern müssen 1515 leer (mit dem Buchstaben  $\odot$  besetzt) sein, in 1450 Feldern steht der Buchstabe e usw., die Buchstaben q und x schließlich kommen nur einmal vor. Dabei ist die Verteilung der Buchstaben auf die Felder ganz willkürlich. Aus diesen Streifen kann die Maschine schon die relativen Häufigkeiten der Buchstaben in deutschen Texten entnehmen.

Noch einfacher ist die Schreibweise

$\odot$  -1515, e - 1450, n - 884, r - 686, ..., y - 2, q - 1, x - 1.

Das ist aber eine Art des Abstrahierens - eine Erhöhung des Informationsgehalts! Und die Maschine kann sie ausführen. Sie muss dazu offenbar alle zulässigen (auftretenden) Gruppen von Signalen nach fallender relativer Häufigkeit anordnen und mit Nummern - Symbolen für die relative Häufigkeit - versehen; die Nummern haben ebenfalls ungleiche Häufigkeiten und ermöglichen eine vereinfachte Schreibweise ... usw. ohne Ende.

Dieser Prozess führt nicht zu einer Erhöhung der inneren Informationsmenge, er verbessert aber ihre Qualität, ihren Gehalt (die mittlere Informationsmenge je Signal) und verringert so das für die Aufbewahrung der Information notwendige Gedächtnisvolumen. Die Maschine merzt nur Wiederholungen aus und bildet kleine Wörterbücher, indem sie die Signalkombinationen entsprechend ihrer relativen Häufigkeit anordnet, aber auch das ist schon sehr viel!

Da beispielsweise die Buchstaben c und g sowie q und x in deutschen Texten annähernd mit der gleichen relativen Häufigkeit auftreten, kann man sie - vom Standpunkt der Statistik der Buchstaben - als statistisch äquivalent, sozusagen als statistische "Synonyme" ansehen und - im Prinzip - auf der nächst höheren Ebene zu einer statistischen "Abstraktion" zusammenfassen.

Dieser Gebrauch der Worte erscheint ungewöhnlich, und man kann zweifeln: Kann man diesen Prozess wirklich als Abstraktion bezeichnen?

---

<sup>60</sup>Zeichen in der Abschrift geändert.

Der Prozess, den man Abstrahieren nennt, ist sehr kompliziert und nicht bis in seine letzten Einzelheiten geklärt. Sein wesentliches Merkmal scheint darin zu bestehen, dass wichtige Gemeinsamkeiten in einer Reihe unterschiedlicher Erscheinungen erkannt werden, diese Gemeinsamkeiten bilden die Basis des beim Abstraktionsprozess entstehenden Begriffs.

Die Ureinwohner Australiens hatten, als sie mit den Europäern bekannt wurden, keine Worte für die abstrakten Begriffe "Baum" und "Vogel". Für sie existierten Palmen, Farne, Sträucher und Eukalypten. "Eine Statistik ihrer Sprache würde zeigen, dass über Farne äußerst selten dasselbe gesagt wird wie über Palmen.

Mit anderen Worten: Ihre Erkenntnis war nicht soweit fortgeschritten, dass sie die Gemeinsamkeiten, die zwischen Palmen, Eukalypten usw. bestehen, als wesentlich erkannt hatten.

Als Ergebnis einer langen Entwicklung der Technik zeigte sich eine Gemeinsamkeit zwischen Sprache, Schrift, Bildern und Zahlen:

Die Sprache lässt sich durch elektrische Signale kodieren,  
Buchstaben lassen sich durch elektrische Signale kodieren,  
Bilder lassen sich durch elektrische Signale kodieren,  
Symbole (Ziffern) lassen sich durch elektrische Signale kodieren.

Dadurch wurde eine gewisse Verwandtschaft und Gleichartigkeit der Begriffe "Sprache", "Schrift", "Bild" und "Signal" aufgedeckt, in deren Ergebnis der abstrakte Begriffe "Information" geschaffen wurde.

Seit einigen Jahren arbeitet man in einer Reihe von Ländern an einer ökonomisch vertretbaren Lösung des Problems, eine abstrahierende Maschine zu schaffen. Wegen seiner großen praktischen Bedeutung wandte man sich dabei zuerst dem Problem der Zeichenerkennung zu, das wir am Schluss des vorigen Kapitels erwähnten. Dabei handelt es sich darum, von einer vorgelegten "Gestalt" zu entscheiden, um welches Zeichen es sich dabei handelt. Maschinen, die zur Lösung dieses Problems fähig sind, bezeichnet man nach einer Anregung des Mathematikers F. Rosenblatt als Perzeptrons (nach dem englischen Wort percept - wahrnehmen).

Nicht zufällig interessierten sich gerade militärische Kreise für derartige Maschinen.

Das Erkennen eines Flugzeugs oder einer Rakete des Gegners an Hand von Signalen einer Radarstation ist eine sehr verantwortungsvolle und schwere Aufgabe. Es ist unmöglich, im Gedächtnis einer determinierten Maschine alle durch Störungen verzerrten Informationen über die Silhouette eines Flugzeugs für einen eventuell Vergleich mit einlaufenden Informationen zu speichern.

Wenn eine stochastische Maschine lernt, diese Silhouette "als Ganzes" wahrzunehmen, so kann man hoffen, dass sie das schneller und genauer tut als beobachtende Menschen in Radarstationen.

Stellen wir vor eine gewöhnliche elektronische Maschine ein unbewegliches schwarzes Quadrat und übertragen in die Maschine seine "Auflösung" durch ein Ikonoskop, so schickt dieses fortlaufend Zeile für Zeile, Bild für Bild und überfüllt so mit der Zeit den Speicher, die Maschine versagt. Schließen wir das Ikonoskop dagegen an ein Perzeptron an, also an eine Maschine, die fähig ist, den Informationsgehalt der eingehenden Signale vor dem Speichern zu erhöhen, so erkennt das Perzeptron bald, dass das Bild des Quadrats sich ungeändert wiederholt, und speichert dann das periodische Signal nur einmal.

Eine Bewegung dieses Quadrats im Blickfeld kann aus einer Serie von Bildern erkannt und auf ein Signal der Form "hat sich um soundsoviel nach links verschoben... bewegt sich in der früheren Richtung mit konstanter Geschwindigkeit ..." usw. verkürzt werden.

Wenn wir dann im Blickfeld zwei, drei gleiche Quadrate in verschiedenen Lagen aufstellen, so erkennt das Perzeptron sie einzeln und notiert ihre Verschiebungen. Bei Quadraten verschiedener Größe und Farbe kann es die sich ändernden Merkmale von der unveränderlichen Form trennen. Ebenso wird das Perzeptron, wenn es mit gesprochenen Wörtern konfrontiert wird, sich diese zunächst in Form eines stetigen Flusses merken, dann entdeckt es bei einem Vergleich, dass sich die Wörter aus einer endlichen Menge verschiedener Laute zusammensetzen, also eine "phonetische Schrift" sind.

Durch Einführung kurzer Kodewörter für die Laute kann das Perzeptron sein Gedächtnis stark entlasten. Dann beginnt es, Wiederholungen von Wörtern festzustellen und Wörter zu kodieren.

Kombiniert man das Bild eines Quadrats, das von einem Ikonoskop eintrifft, ständig mit dem Wort "Quadrat", das durch ein Mikrofon von dem Versuchsleiter eintrifft, so wird auch dieser Zusammenhang bemerkt und festgehalten. Bild und Wort werden einander assoziiert.

Gegenwärtig gibt es eine ganze Reihe von mathematischen Theorien des Perzeptrons. Einige von ihnen wurden durch die Programmierung universeller elektronischer Rechenmaschinen geprüft. In den USA bauten die Ingenieure J. C. Hay, F. C. Martin und C. W. Wightman die spezielle Anlage "Mark 1", die eine der Theorien des Perzeptrons realisiert.

Die nützlichsten Ideen sind, wie es scheint, die des jungen sowjetischen Mathematikers Emmanuel Brawerman, der Mitarbeiter des Moskauer Instituts für Automatik und Telemechanik ist. Sie wurden durch die Programmierung eines Rechenautomaten für das Erkennen verschiedener Formen von Buchstaben geprüft.

Die Versuche, die Ende des Jahres 1961 durchgeführt wurden, lieferten ausgezeichnete Ergebnisse. Es wurden etwa 1000 in verschiedener Weise geschriebene Ziffern vorbereitet. Zweihundert davon dienten zur Unterrichtung der Maschine, d. h., man legte der Maschine diese Zeichen vor und teilte ihr in einem vereinbarten Kode mit, welches Zeichen gerade vorliegt. Dann wurden der Maschine die übrigen 800 "Gestalten" vorgezeigt, und die Maschine musste sie erkennen. Bei diesen 800 Versuchen wurden nur 4 Fehler registriert. Wir kommen später noch genauer auf Brawermans Ideen und ihre Realisierung zurück.

Die fünf Einschränkungen von Cossa haben also einen realen Sinn. Sie beschränken allerdings die Möglichkeiten der heutigen und zukünftigen Maschinen nicht für immer, sie trennen den besonderen "Verstand" nicht von den anderen Arten der Informationsverarbeitung, wie Cossa glaubte.

Sie trennen aber klar zwei Klassen von Maschinen, die determinierten Maschinen und die stochastischen. Für stochastische Maschinen gelten die Einschränkungen von Cossa nicht. Wie es scheint, gibt es aber nicht eine einzige Einschränkung, die für Wahrscheinlichkeitsmaschinen gültig ist, aber den Verstand und das Gehirn nicht betrifft.

"Demnach", bemerkte J. von Neumann, "scheint das Nervensystem ein Darstellungssystem zu verwenden, das sich von den uns aus der gewöhnlichen Arithmetik und Mathematik bekannten Systemen völlig unterscheidet: Statt des präzisen Markierungssystems, bei dem die Position - sowie das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein - jeder Markierung entscheidend für die Interpretation der Nachricht ist, haben wir hier ein Bezeichnungssystem, bei dem die Bedeutung durch statistische Eigenschaften der Nachricht übertragen wird.

Das "Perzeptron", das die Technik zu schaffen versucht, existiert und arbeitet schon heute aktiv: Es ist das lebende Gehirn, insbesondere das Gehirn des Menschen.

## 15 Das Gehirn, Vermutungen und Fakten über die Funktionsweise eines lebenden stochastischen Systems



Wo wohnt die Seele? - Der Streit um Seele und Körper - Wie wurde der Reflex entdeckt? - Hypothesen über die Arbeitsweise des Gehirns - Wo befindet sich das Programm des Menschen? - Beobachtungen an Geistesgestörten - Warum denken Tiere nicht? - Das Denken der Menschheit als Ganzes - Wie hat man die Namen der Sterne erfahren? - Ich und Wir - Die Sprache des Gehirns

Die großen Denker der Antike wussten oder ahnten schon viel von der Natur der Dinge, ihre Vermutungen und Schlussfolgerungen bilden die Quelle vieler Zweige der modernen Wissenschaft. Im Lichte der heutigen Kenntnisse und Erfahrungen erscheinen uns jedoch ihre Behauptungen nicht selten vollkommen unwahrscheinlich.

Sie behaupteten zum Beispiel, dass die Strahlen, die das Sehen ermöglichen, von den Augen ausgehen. Das Herz hielten sie gewöhnlich für das höchste Organ des Handelns und Fühlens der Menschen und Tiere. Erst Alkmäon, ein Schüler des Pythagoras, der im 5. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung lebte, sprach zum ersten Mal den Gedanken aus, dass allein das Gehirn die Signale der Umwelt wahrnimmt, Träger des Verstandes ist und die Handlungen des Körpers lenkt.

Noch heute berufen wir uns in der Umgangssprache auf das Herz, das angeblich für unsere Sympathien und Antipathien verantwortlich ist, obwohl das Herz nichts weiter ist als eine automatisch regulierte Pumpe, die das Blut durch die Adern treibt.

Später hielten die Griechen das Gehirn für den Sitz der "Seele", einer besonderen Substanz, von deren Anwesenheit angeblich Leben und Verstand des Menschen abhängen.

Die alten Materialisten, angefangen von Demokrit, verliehen dieser Substanz keinen mystischen Charakter: Sie hielten die Seele für materiell, aus kleinen kugelförmigen Atomen bestehend. Das Feuer hielten sie für eine Seele in ihrer reinen ungebundenen Form. Die Kondensation der Seele liefert nach Anaximenes zuerst Luft, dann Wasser, darauf Erde und schließlich Steine.

Nach Plato existieren im menschlichen Körper drei gewöhnliche sterbliche und natürliche Seelen und außerdem eine göttliche unsterbliche. Die Seele der Vernunft hat ihren Sitz im Kopf, die des Gefühls im Herzen; der Organismus, so behauptete Plato, verengt sich am Hals, damit das Gefühl nicht zuviel Einfluss auf das vernünftige Handeln gewinnt.

Die niedrigste, die vegetative Seele, befindet sich im Bauch und ist von den beiden anderen durch das Zwerchfell getrennt.



Nur die Pythagoräer lehrten, dass die Seele kein Stoff ist, sondern eine Beziehung, die Harmonie zwischen den Körperteilen; damit kamen sie den modernen Vorstellungen über die Information nahe. Als man aber begann, auf dem Begriff der unsterblichen und immateriellen Seele den ganzen Komplex der Glaubenssätze der christlichen Religion aufzubauen, erklärte man, dass die Seele im Gegensatz zur gesamten übrigen Welt prinzipiell nicht erkennbar und Untersuchungen unzugänglich sei.

Bekanntlich gibt es im Körper des Menschen und der Tiere kein Organ des "Lebens an sich". Zellen, Gewebe und ganze Systeme von diesen (Organen) können in einem richtig zusammengestellten ernährenden Medium den Stoffwechsel fortsetzen und wachsen, einige Organe können dabei die gleiche Funktion ausüben, die sie im Organismus ausgeübt haben.

Eine Kultur von Zellen, die man vor zwanzig Jahren aus dem Herzen eines Hühnerembryos herausgenommen hat, lebt und vermehrt sich noch heute. Zu Forschungszwecken erhält man in manchen Laboratorien Krebszellen "Hela" am Leben, die man aus dem Körper einer jungen, an Krebs gestorbenen Amerikanerin herausgeschnitten hat.

Allerdings kann man ganze Körperteile nicht lange isoliert vom Organismus am Leben erhalten, da man vorläufig die regulierenden biochemischen und nervösen Einflüsse, die die Stabilität der Gewebe und Organe sichern, unter Laboratoriumsbedingungen noch nicht alle nachahmen kann.

Für eine einzelne Zelle genügt es im allgemeinen, bestimmte Umweltbedingungen konstant zu halten; je komplizierter aber die Kombination der Zellen ist, desto größer wird die Rolle der Rückkopplungen und Regelkreise, die beim Herausnehmen dieser Kombination aus dem Organismus aufgetrennt wurden und deren Rolle vollständig aufzudecken und zu reproduzieren bei weitem nicht immer gelingt.

Der hervorragende französische Denker René Descartes (1596-1650) begann als erster aktiv die Überzeugung zu verteidigen, dass Lebewesen Automaten sind und dass ihr Gehirn ein Signalsystem ist, das durch die Sinnesorgane Signale aus der Umwelt erhält und den Muskeln des Körpers Befehle erteilt.

Descartes machte eine Ausnahme nur für den Verstand des Menschen, dessen besondere Eigenschaften er einer unsterblichen "Seele" zuschrieb. Den Sitz dieser Seele "fand" Descartes in der Zirbeldrüse, einem winzigen Gebilde im Gehirn, das als einziger Teil des Gehirns nicht doppelt auftritt; es liegt auf der Symmetrieebene des Gehirns.

Heute hat die Wissenschaft festgestellt, dass die Zirbeldrüse ein Rudiment, ein degeneriertes drittes Auge ist, das irgendwann einmal bei heute ausgestorbenen Reptilien existierte.

"Die Seele erzeugt die Bewegung nicht, sondern sie lenkt sie", sagt Descartes.

Die moderne Wissenschaft kennt im menschlichen Organismus tatsächlich mindestens drei Systeme, die über Information verfügen: das System der Vererbung, die Struktur der Nervenbahnen und das Speichersystem, das die Information, die im Laufe des Lebens vom Gehirn gesammelt wird, aufnimmt.

Information kann man, wie der Leser weiß, tatsächlich nicht als "materiell" ansehen; sie ist kein Stoff und keine Energie, sondern eine Beziehung zwischen materiellen Prozessen, zwischen Signalen. Die Erbinformation wird durch ihre Vererbung auf die Nachkommen unsterblich und die vom Menschen aktiv gesammelte Information durch den Verkehr der Menschen, durch den Austausch von Erfahrungen, Kenntnissen und Gefühlen.

Der Hauptpunkt, in dem wir von den alten Vorstellungen über die "Seele" abweichen, ist die Überzeugung, dass Information immer mit irgendeinem materiellen Prozess verbunden und oh-

ne Signale nicht denkbar ist, wenn sie auch eine bestimmte Unabhängigkeit diesen Prozessen gegenüber zeigt.

Indem sie die "Seele" vollständig vom Körper trennten, gerieten die alten Philosophen in eine Sackgasse: Einerseits wurde vollkommen unverständlich, wie sich Zustände der absolut immateriellen Seele in Lauten der Stimme verkörpern können, die durch mechanische Bewegungen der Stimmbänder, der Zunge und der Mundhöhle hervorgerufen werden, wie sie die Handlungen der Arme und Beine lenken können.

Andererseits wurden die Wirkungen des Körpers auf die Seele, z. B. der Schmerz einer Wunde oder der von Wein hervorgerufene Rausch, unverständlich.

Wenn Seele und Körper Dinge von so verschiedener Natur sind, so können sie nicht in Berührung kommen, nicht aufeinander einwirken! Man hat viele Kniffe angewendet, um diese Frage irgendwie zu beantworten. Geulinx und Leibniz versuchten zu beweisen, dass die Zustände der Seele und des Körpers von vornherein aufeinander abgestimmt sind wie zwei Uhren, die ein und dieselbe Zeit anzeigen.

Der englische Philosoph Berkeley und nach ihm viele andere Idealisten erklärten, die ganze Welt und damit auch der Körper existiere nur in der Seele wie ein Traum, und in Wirklichkeit gäbe es weder die Natur noch andere Menschen.

Die Anhänger von Descartes, unter ihnen der Verfasser des Buches "Der Mensch - eine Maschine", Julien de Lamettrie (1709-1751) und Pierre-Jean-Georges Cabanis, beraubten die Seele auch ihrer letzten Zufluchtsstätte in der Zirbeldrüse, indem sie behaupteten, der ganze Automatismus des Menschen lasse sich durch die physikalischen Eigenschaften der Materie erklären. Cabanis und nach ihm Vogt und Moleschott stellten die Arbeitsweise des Gehirns in ganz naiver Weise allen anderen Funktionen des Organismus gleich.

Lamettrie lehrte, dass die Seele wie alle anderen Organe zusammen mit dem Körper geboren wird, wächst und altert.

Diese Gelehrten und ihre Anhänger verfielen in das andere ebenso falsche Extrem. In den Vorstellungen der Idealisten war das Denken von der Materie vollkommen losgelöst und konnte daher auf nichts einwirken und hing von nichts Realem ab.

Bei den Vulgärmaterialisten war das Denken lediglich eine Funktion der Materie, aber das Ergebnis war das gleiche: Das Denken kann bei beiden Auffassungen nicht mit der umgebenden Realität in Wechselwirkung treten, es kann sich nicht durch den Verkehr der Menschen untereinander bereichern und ist daher auch blind, taub und fremd gegenüber der Umwelt und der Gesellschaft.

Sie sahen nicht, dass Information von einem Signalsystem auf ein anderes übertragen werden kann, dass die Information eine gewisse Selbständigkeit gegenüber ihren Trägersignalen besitzt.

Die Vulgärmaterialisten sahen in der Natur nichts anderes als Stoff und Energie. Der Begriff "Maschine" hatte für sie nur eine Bedeutung: Die "einfachen Maschinen" der damaligen Zeit waren Umformer von mechanischen Bewegungen, und die komplizierten wurden als Summe einfacher Maschinen angesehen und konnten, natürlich keine neuen Eigenschaften aufweisen.

Spätere Untersuchungen zeigten, dass das Nervensystem der Tiere aus zwei Teilen besteht. Der niedrigere besitzt alle Züge eines festen, programmierten Automatismus (den man, nebenbei bemerkt, auch bei Maschinen erreicht hat); der höhere zeichnet sich durch Wendigkeit, durch eine Anpassungsfähigkeit an die Umweltbedingungen und durch viele andere Eigenschaften aus, die man in der unbelebten Natur und in der Technik nicht beobachtet hat.

Träger des niedrigeren Automatismus ist das ganze Nervensystem des Körpers und Teile des

Gehirns außer der sogenannten Großhirnrinde (Cortex), die eine Neuronenschicht von nur einigen Millimetern Dicke umfasst.

Der Unterschied zwischen beiden Teilen des Nervensystems wurde durch die klassischen Versuche aufgedeckt, die der französische Physiologe Flourens 1824 durchführte und die später mehrfach wiederholt wurden.

Bei einem Tauber wurden die Hemisphären des Großhirns operativ entfernt. Nachdem er sich von der Operation erholt hatte, konnte der Tauber laufen, fressen, Gefühle empfinden und diese zum Ausdruck bringen. Er hatte jedoch sein Gedächtnis vollständig verloren und damit auch die Fähigkeit, Dinge der Umwelt zu unterscheiden und zu klassifizieren.

Er fürchtete weder Menschen noch Katzen oder Raubvögel. Er erkannte weder sein Weibchen noch die Jungen, die um Futter baten, und er war auch nicht fähig, das Futter von anderen Dingen zu unterscheiden.

Der amerikanische Psychologe James beschrieb seinen Eindruck von einem ebenso operierten Frosch später wie folgt:

"... Er stellt eine äußerst komplizierte Maschine dar, deren zahlreiche Handlungen, soweit sie in Erscheinung treten, auf die Selbsterhaltung gerichtet sind, aber dennoch eine Maschine in dem Sinne, dass er augenscheinlich keine Bewegung kennt, die man nicht vorher berechnen konnte. Übt man auf ein solches Tier einen korrekten Sinnesreiz aus, so kann man mit einer bestimmten Reaktion genauso sicher rechnen, wie ein Organist beim Drücken einer Taste der Orgel mit dem Erklängen eines bestimmten Tones rechnet."<sup>61</sup>

Das Hauptaugenmerk der Forscher galt dem Aufbau und der Arbeitsweise der Großhirnrinde. Das Mikroskop zeigte jedoch dort nichts als Neuronen, die erregt sein oder ruhen können und ihre Erregung an die Synapsen anderer Neuronen über ihre Axone weitergeben.



Bild 15.1.: In der Skizze eines vertikalen Schnitts durch die Großhirnrinde kann man horizontale isolierende Myelinschichten und eine Vielzahl verschiedenartiger Neuronen erkennen.

Allerdings wurden sogar zu Beginn unseres Jahrhunderts manchmal noch Sensationen verbreitet, etwa, dass man bei der Untersuchung des Gehirns eines gestorbenen Ägyptologen auf einem Neuron einen winzigen Abdruck ägyptischer Hieroglyphen gesehen habe. Aber das waren Erfindungen von Journalisten!

Die weiteren Versuche, die Tätigkeit des menschlichen Gehirns zu entschlüsseln, führten zur Entdeckung eines allgemeinen Plans, der gewissermaßen die Verteilung von Eigenschaften des psychischen Lebens über die Oberfläche der Großhirnrinde angibt.

Den Grundstein zu diesen Untersuchungen legte der österreichische Arzt Gall mit der Schaffung einer besonderen "Wissenschaft", der Phrenologie. Gall hielt die Hemisphären des Großhirns für eine Gesamtheit von "Organen", die getrennt die einzelnen Eigenschaften der menschl-

---

<sup>61</sup>W. James: Wissenschaftliche Grundlagen der Psychologie, Petersburg 1902. Hier ist das gemeint, was wir im Gegensatz zur stochastischen Maschine als "determinierte" Maschine bezeichnen würden.

chen Persönlichkeit bestimmen. So behauptete er, im Hinterhaupt säße ein "Organ der Liebe zu Kindern" und darüber befänden sich "Organe der Anhänglichkeit" und "der Eitelkeit".

Das Training eines jeden "Organs" führte nach Galls Meinung zu einem Wachsen seines Volumens, wodurch sich in der Schädeldecke über solchen entwickelten oder durch Vererbung leistungsfähigen "Organen" Beulen bilden. Gall übernahm es, die Fähigkeiten eines Menschen aus der äußeren Form seines Schädels zu bestimmen.

So behauptete er zum Beispiel, dass sich über der Stirn das "Organ der Frömmigkeit" befindet und führte als "Beweis" an, dass ältere Geistliche an dieser Stelle Erhebungen auf ihren Glatzen besonders deutlich erkennen lassen.

Genauere Untersuchungen zeigten, dass die Phrenologie eine Pseudowissenschaft ist: man lachte über sie und vergaß sie. Indem er Schicht für Schicht der Rinde eines lebenden Gehirns abnahm, zeigte Flourens, dass sich dabei das Gedächtnis sowie die Anpassungsfähigkeit an Veränderungen der Lebensverhältnisse allmählich und gleichmäßig verschlechtern, bis der Verstand als Ganzes erlischt.

Dieses Ergebnis zeigte, dass sich die Eigenschaften des Gehirns durch derartige Methoden nicht klären lassen. Die übliche Analyse, die Zerlegung einer komplizierten Erscheinung in ihre Bestandteile und die Untersuchung dieser Teile und ihrer Wechselwirkungen, konnte zunächst nicht mehr feststellen, als dass das Gehirn aus Neuronenzellen besteht.



Bild 15.2.: Man kann sich das Gehirn als System einer gigantischen Zahl von Gedächtniskreisen, in denen Signale zirkulieren, vorstellen. Einige dieser Kreise ziehen sich bis zu Sinnesorganen hin bzw. sind direkt mit diesen verbunden und nehmen so Informationen aus der Umwelt auf.

Im Jahre 1906 stellte der Physiologe Sherrington eine Hypothese auf, die die Eigenschaften des Gehirns dadurch erklärt, dass in ihm neue Strukturen geschaffen werden, die neuer Erfahrung, neuem Wissen entsprechen. Sherrington entdeckte, dass die Berührungsstellen der Neuronen - die Synapsen - manchmal aufhören, Reize zu übertragen, ihre Permeabilität ändern und dadurch die Entstehung von Strukturen bewirken.

Thorndike sprach schon vom direkten Schließen und Öffnen der Synapsen durch Bewegungen der Zellfortsätze, und als man unter starken Mikroskopen an den Dendriten besondere kleine Auswüchse, "kleine Dornen", entdeckte, schrieb man diesen die Rolle der Umschalter zu. In den Vorstellungen dieser Physiologen war das Gehirn also eine Ansammlung von Milliarden von sich bewegenden Schaltern, von denen die einen sich mit der Zeit fest schließen und die Gewohnheiten bilden, während die anderen sich das ganze Leben lang schließen und öffnen.

Aber die Praktiker der Nervenpathologie begegneten diesem Modell misstrauisch. Aus ihren Erfahrungen ging hervor, dass die Nervenfasern sehr langsam wachsen, dass dort, wo eine Neuronenkette zerstört worden ist, jede Art ihrer Schließung Jahre dauert.

Das Denken ist dagegen in der Lage, in sehr kurzen Zeitabschnitten viele verschiedene Einzelheiten zu erfassen: Nicht umsonst sagt man, das Schnellste seien die Gedanken. Wären die Neuronen einfache Schalter, so müsste sie irgend etwas dirigieren, sie schließen und öffnen: Man hatte die unbekannte "Größe" also nicht gefunden, sondern gewissermaßen ausgeklammert.

Nachdem man durch elektrische Reizung von Neuronen eine Vorstellung von dem ziemlich komplizierten Ionenaufbau innerhalb der Zellen erarbeitet hatte, betrachtete man die Wech-

selwirkung der vielen Zellen in der Hirnrinde im Hinblick auf diesen Umbau - auf Erregung und Hemmung. Aber auch die Schlussfolgerungen, die man auf diesem Wege erhielt, waren wenig überzeugend.

Obwohl sehr viele Untersuchungen über den Aufbau des Gehirns und seine Arbeitsweise, d. h. über seine Anatomie und sein Verhalten, unternommen wurden, konnte die Wissenschaft das Geheimnis der Arbeitsweise des Gehirns noch nicht enthüllen.

Es wurde sogar die Ansicht geäußert, dass diese Aufgabe unlösbar sei, da zur vollständigen Beschreibung der Arbeit eines Systems ein System erforderlich sei, das größer ist als jenes, was beschrieben werden soll - die Arbeitsweise des Gehirns könne nur eine Einrichtung verstehen, die leistungsfähiger ist, als das Gehirn selbst.

"Ich vermute", sagte der amerikanische Gelehrte M. Maron, "dass kein Psychologe jemals eine solche Beschreibung wird geben können. Vielleicht rührt meine Ansicht von dem paradoxen Fakt her, dass eine solche vollständige Beschreibung des Gehirns die Beschreibung dessen einschließen muss, wie ein Gehirn versucht, ein anderes Gehirn zu verstehen, und so weiter bis ins Unendliche."<sup>62</sup>

Für diese pessimistische Schlussfolgerung gibt es aber keine ernsthaften Gründe.

Wenn man die Information, die in den 100 Trillionen Gedächtniselementen eines menschlichen Gehirns niedergelegt ist, vollständig und ohne Änderungen abschreiben will, so braucht man natürlich mindestens ebenso viele Elemente.

Aber diese Arbeit ist nicht nur undurchführbar, sondern auch sinnlos, da wir nach Erhalt einer Kopie in dieser natürlich keinen Hinweis auf die Lösung des Rätsels finden, wenn die Lösung nicht schon in dem kopierten Gehirn enthalten war. Und was die Hauptsache ist:

Unsere Erkenntnis realer Erscheinungen besteht doch nicht in der pedantischen Wiedergabe dieser Erscheinungen mit allen ihren zufälligen Einzelheiten, sondern in der Suche nach möglichst gehaltvollen, möglichst ökonomischen Modellen für das, was an ihnen allgemein, beständig und wesentlich ist. Wenn wir uns nicht die sinnlose Aufgabe stellen, den Zustand des Gehirns eines bestimmten Cajus oder Lucius zu einem festen Zeitpunkt zu verstehen und zu beschreiben, sondern versuchen, das zu beschreiben, was den Gehirnen aller Menschen gemeinsam ist und was zu jeder Zeit gilt, so ist zu hoffen, dass diese Beschreibung nicht übermäßig lang wird und dass nach ihrer Aufnahme ins Gehirn eines Menschen noch viel Platz für andere Nachrichten bleibt.

Gewöhnlich sagt und schreibt man, dass das Gehirn "höchst kompliziert gebaut ist". Das scheint klar und verständlich zu sein, ist aber dennoch nicht exakt.

Was bedeutet "kompliziert"? Der Sinn dieses Wortes ist der folgende: "Die durch die Struktur des gegebenen Systems realisierte Informationsmenge ist groß." Früher oder später werden wir lernen, jede Kompliziertheit genau in Bit auszurechnen.

Ein Sandhaufen hat viele Teile, eine Schreibmaschine weit weniger. Trotzdem besitzt die Schreibmaschine eine kompliziertere Struktur als der Sandhaufen, da alle Teile des Haufens gleich sind:

Informationen über ein Sandkorn und über die Anzahl der Sandkörner und ihre Wechselwirkungen beschreiben den Haufen fast vollständig. Eine Schreibmaschine besitzt dagegen verschiedene Teile; eine vollständige Information über eine Schreibmaschine muss alle Unterschiede

---

<sup>62</sup>Symposium: The design of machines to simulate the behavior of the human brain. Trans. IRE. EC-5, Nr. 4/1956, p. 240 bis 255. (Das Konstruieren von Maschinen, die das Verhalten des menschlichen Gehirns simulieren können.)

der Teile und ihre verschiedenartigen Wechselwirkungen berücksichtigen.

Eine winzige Zelle des menschlichen Organismus, die unter dem Mikroskop kaum sichtbar ist, enthält ebensoviel Information wie der ganze Organismus, da sich der Organismus aus einer Zelle entwickelt. Ein Bauplan in einer Mappe enthält ebensoviel Information wie das ganze Gebäude. Allerdings enthält er keine Information über die Mieter, die in das Gebäude einziehen und über die Veränderungen, die diese Mieter am Gebäude vornehmen.

Vom Standpunkt der Kybernetik ist das Gehirn eine zentrale Steueranlage stochastischer Art mit einem Volumen von etwa 1,5 l und einer Masse von etwa 1,5 kg, einem Leistungsbedarf von ungefähr 25 W und einem Gedächtnisvolumen von ungefähr  $10^{14}$  bit, die im Tagesrhythmus periodisch auf Kosten von Informationspotentialen in der Umwelt Information sammelt und den Gehalt der inneren Information erhöht.

Das Gehirn eines Neugeborenen ist seiner Struktur nach dem Gehirn eines Erwachsenen fast gleich; anatomische Untersuchungen zeigen, dass sich die Anzahl der Neuronen während des ganzen Lebens nicht vergrößert. Im subkortikalen Teil des Gehirns von Neugeborenen gibt es bestimmte angeborene Strukturen, die einige zweckmäßige Handlungen sichern, beispielsweise das Atmen und Saugen.

Psychologen entdeckten bei einer aufmerksamen Beobachtung von Neugeborenen, dass sie von den ersten Tagen ihrer selbständigen Existenz an zu mindestens drei Arten von komplizierten Verhaltensweisen fähig sind, die Äußerungen von Angst, Zorn oder Vergnügen bilden. Angst tritt bei jeder starken Einwirkung auf die Sinnesorgane und beim Verlust des Gleichgewichts auf; die gezeigte Verhaltensweise ist manchmal einer fast allen Tieren eigenen, sehr alten und zweckmäßigen Verhaltensweise sehr ähnlich, nämlich dem Erstarren bei Gefahr (Totstellen).

Das Tier erreicht dadurch, dass es vom Hintergrund der unbewegten Gegenstände schlechter zu unterscheiden ist. Den Zorn eines Neugeborenen kann man leicht erregen, indem man es an der Bewegung hindert. Das Vergnügen des Kleinkinds ruft man gewöhnlich durch eine leichte und rhythmische Reizung von empfindlichen Stellen der Haut hervor. Ein Schaukeln, das rhythmisch auf die Gleichgewichtsorgane des Körpers einwirkt, führt zu dem gleichen Ergebnis.

Der Psychologe schenkt dem Kleinkind natürlich nicht nur deshalb Aufmerksamkeit, weil es ein geduldiges Geschöpf ist, das über viel freie Zeit verfügt. Der Psychologe geht wie jeder Wissenschaftler vor, er untersucht eine unverständliche Erscheinung zunächst in ihrer einfachsten Form. Nachdem er ein statistisch überzeugendes Ergebnis erhalten hat, spricht er folgende offenbar glaubwürdige Vermutung aus: Irgendwo in den Tiefen des Gehirns gibt es Zentren der Angst, des Zorns und des Vergnügens, die die einlaufenden Signale beobachten und unter gewissen Bedingungen aktiv werden, dabei entstehen Befehle, die den Zustand und das Verhalten des Organismus bestimmen.

Den Psychologen unterstützt der Psychiater, der berichtet, dass Angst, Zorn und Vergnügen bei einigen krankhaften Prozessen im Gehirn eine übermäßig große Rolle im Verhalten des Kranken spielen. Der eine Kranke verspürt ständig Angst; bei dem Versuch zu erraten, was ihn eigentlich ängstigt, denkt sich der Kranke Verbrechen aus, für die man ihn bestrafen kann, Feinde, die ihm auf der Spur sind, und ähnliche schreckliche Dinge.

Ein anderer Kranker lächelt grundlos, freut sich über alles, seine Reden sind gutmütig, und man kann annehmen, dass er ständig ohne jeden äußeren Anlass Vergnügen empfindet.

Diesen Zustand nennen die Psychiater "Euphorie". Er kann die Folge einer krankhaften Empfindlichkeitssteigerung des Vergnügenszentrums sein. Das gewalttätige Verhalten eines dritten Kranken, der plötzlich bei dem kleinsten Anlass beginnt, alles rundherum wütend zu zerstören,

kann von einer anormalen Reizbarkeit des Zornzentrums herrühren.

Diese Schlussfolgerungen müssen Vermutungen bleiben, solange nicht der Physiologe zu Hilfe kommt, diese Zentren im Gehirn von Versuchstieren lokalisiert und bei ihrer Reizung entsprechende Änderungen des Verhaltens feststellt. Wie sich aus Versuchen ergab, spielt die netzartige Struktur (die "formatio reticularis") des Stammhirns die Rolle eines Kommutators, der die einzelnen Gebiete des Gedächtnisses in die aktive logische Tätigkeit einschaltet. Hier befindet sich auch das vor kurzem entdeckte Vergnügungszentrum, dessen Struktur eine erste primitive Auswahl von Verhaltensweisen, die für den Organismus zweckmäßig sind, bestimmt.



Bild 15.3.: Die "glückliche" Ratte täuscht sich durch Reizung ihres "Vergnügungszentrums"; eine nicht vorhandene Befriedigung ihrer Bedürfnisse vor.

Man reizte in Versuchen das Stammhirn von Ratten durch elektrische Impulse und brachte ihnen bei, diese Impulse selbst einzuschalten. Das Ergebnis war, dass die Ratte, anstatt die Tätigkeit ihres Gehirns und ihres ganzen motorischen Systems auf die Befriedigung der Bedürfnisse ihres Organismus zu richten, sich durch das Drücken eines Pedals "vergnügte", d. h. in ihrem Gehirn ein irreführendes Signal erzeugte - sie trank, aß und schlief nicht bis zur völligen Erschöpfung.

In nächster Zeit wird man vermutlich die Zentren des Zorns und der Angst im Gehirn lokalisieren.

Man kann jedoch selbst diesem überzeugenden Experiment am lebenden Organismus vorwurfsvoll und misstrauisch begegnen. Es ist verhältnismäßig leicht, die Zentren der Emotion "berüchtigt" zu nennen, in einem Artikel mehrmals das Wort "angeblich" zu gebrauchen und die Forscher zu verdächtigen, sie strebten danach, das wahre Bild der Dinge zu "simplifizieren", zu vulgarisieren und "auf einen Mechanismus zurückzuführen".

Hier muss die Kybernetik zu Hilfe kommen. Ausgehend von den allgemeinen Gesetzen der Steuerung erkennt die Kybernetik in den Emotionen die Äußerung eines Automatismus in der verhältnismäßig einfachen Form einer Programmsteuerung.

Das Programm muss sich, wenn es vererbt wird, zwangsläufig in der Struktur der Nervenbahnen und Neuronen ausdrücken. Die Kybernetik stellt natürlich die Frage: Kann man diese Sache modellieren, kann man eine Maschine bauen, die fähig ist, sich zu ängstigen, zu ärgern oder zu freuen?

Dieser Gedanke mutet zunächst wie ein schlechter Scherz an, denkt man aber darüber nach, so kommt man zu dem Schluss, dass eine Maschine, die Verhaltensweisen auswählt, die ihr Vergnügen bereiten, für uns von unschätzbarem Wert wäre, da es in unserer Macht steht, sie mit Kriterien für ihre Zufriedenheit zu versehen, die für uns vorteilhaft sind.

Außerdem kann man der Maschine auf verschiedenen Wegen unsere eigene Zufriedenheit oder Unzufriedenheit mit ihrer Tätigkeit übermitteln. Das eröffnet großartige Perspektiven für die "Erziehung" von Maschinen ohne besondere Anstrengungen und Rechnungen, einfach durch

die Beurteilung ihrer Arbeit durch einen Menschen.

Was Zorn und Angst betrifft, so sind sie für gewöhnliche Maschinen, die in Fabriken, in Bergwerken oder im Haushalt arbeiten, offenbar überflüssig und schädlich. Aber für irgendeinen landwirtschaftlichen Automaten, der ungebunden über die Felder zieht, wäre es nicht zum Schaden, ihn mit Umsicht, Vorsicht und einer gewissen Angst auszustatten, damit er eher stehenbleibt als in eine unvorhergesehene, für uns unangenehme Lage gerät.

Bei der Projektierung, dem Bau und der Erprobung von "emotionalen" Automaten werden die Ingenieure zwangsläufig heute noch verborgene Tücken dieses Problems entdecken und gleichzeitig unerwartet einfache und weitreichende Lösungen finden, die eigentlich auch dem Psychologen, dem Psychiater und dem Physiologen einfallen könnten. Aber die Position des Schöpfers eines Systems erweist sich stets als fruchtbarer als die Position des bloßen Beobachters.

Die gleichen Prinzipien sind auch auf die Untersuchung jener höheren Eigenschaften der Gehirntätigkeit anwendbar, die über den Rahmen einer einfachen Abwicklung von Programmen hinausgehen, wie das Gedächtnis, die Logik, die Abstraktion, die Modellierung der Umwelt und die Verwendung dieses Modells bei der Suche nach Wegen zu einem gestellten Ziel.

Alle diese Funktionen übt im Gehirn die graue Substanz, die Großhirnrinde, aus. Bei einem Neugeborenen besteht sie aus einer Menge von Neuronen, die aufeinander einwirken, erregt und gehemmt werden, aber zu keinem zweckmäßigen Verhalten führen. Der Inhalt der Signale in der Großhirnrinde eines Neugeborenen ist Rauschen.

Wenn das Kleinkind die ersten Wahrnehmungen macht und die ersten zweckmäßigen Bewegungen ausführt, so beginnt sich im Gehirn eine genau geregelte Wechselwirkung der Neuronen herauszubilden. Wie empfindliche Geräte, die die elektrische Aktivität der Hirnrinde messen, zeigen, sind der Rhythmus, die Aufeinanderfolge und die Exaktheit dieser Wechselwirkungen bei Neugeborenen sogar größer als bei Erwachsenen.<sup>63</sup>

Die in diesen Wechselwirkungen enthaltene Information ist äußerst redundant. Das Gehirn füllt sich offenbar nicht so mit Nachrichten, wie wir ein leeres Heft vollschreiben. Um das Gehirn nachzuahmen, müsste man zuerst das ganze Heft mit zufälligen Buchstabenkombinationen füllen und dann nach und nach das Geschriebene durchstreichen und verbessern.

Könnten wir das ganze physikalische Bild des Gehirns eines geistig reifen Menschen bis ins einzelne, bis zum letzten Ion untersuchen, so würden wir im Vergleich zum Gehirn eines Säuglings kaum etwas Neues entdecken außer den bekannten Alterserscheinungen, wie der Ablagerung von Cholesterin in den Adern und der Degeneration einiger Zellen.

Die übrigen Neuronen stehen immer noch in Wechselwirkung, sie werden erregt und gehemmt. Aber jetzt existiert in diesem Prozess eine feinere Ordnung, eine kompliziertere Koordinierung, die durch eine gehaltvollere Information bestimmt wird.



Bild 15.4.: Wie soll ein Analphabet den Wert von Büchern beurteilen?

---

<sup>63</sup>W. Grey Walter: Die elektrische Aktivität des Gehirns. Sammelband: "Physik und Chemie des Lebens".)



Man gebe einem Analphabeten mehrere Bücher: die Werke von Shakespeare, einen Schundroman und einen typografischen Scherz - regellos angeordnete Buchstaben. Untersucht er die Einbände, das Papier und die Gestalt der Buchstaben, so kann er kein Buch dem anderen vorziehen, selbst wenn er für seine Untersuchungen ein Mikroskop zu Hilfe nimmt.

"Der ganze Unterschied zwischen ihnen", so denkt er, "besteht nur in der Reihenfolge der Buchstaben: Hier steht dieser schlanke vor dem runden und da umgekehrt. Ist das wirklich so wichtig?"

An die Arbeit der Hirnrinde muss man von einem besonderen Standpunkt aus herangehen; nicht die Feinheit des "Papiers" und der "Buchstaben" dieses erstaunlichsten aller "Bücher" hat man zu betrachten, sondern die Reihenfolge der "Buchstaben", d. h. die in den Signalen verkörperte Information. Ein Neuron wird erregt, die Erregung pflanzt sich längs des Axons zu weiteren Neuronen fort und erregt oder hemmt diese - und das bedeutet, dass eine Informationsverarbeitung erfolgt ist.

Die Arbeit des Gehirns ist dadurch möglich, dass die in ihm gespeicherte Information in einem einheitlichen Kode ausgedrückt ist. Die Erregungen der Zellen unterliegen einem Rhythmus, und diese Schwingungen werden durch äußere Einwirkungen auf die Rezeptoren, insbesondere die Sinnesorgane, moduliert. Wir können zunächst einmal annehmen, dass es sich hier um eine Deltamodulation handelt, die den normalen Binärkode liefert.

Es ist bekannt, dass ein "Gedächtnis", das Binärkodewörter aufbewahrt, in diesem Kode nicht nur einfache Bewegungsprogramme oder Nachrichten über äußere Einwirkungen enthalten kann, sondern auch die höchsten und abstraktesten Gedanken, die sich durch Wörter, Formeln oder grafische Darstellungen ausdrücken lassen.

Die Überlegungen eines Tischlers über die Form der Beine eines entstehenden Tisches lassen sich ebensogut im Binärkode ausdrücken wie die Einsteinsche Relativitätstheorie: zum Beispiel durch Kombinationen von Nullen und Einsen oder längs der Nervenbahnen durch Kombinationen von Erregungen und Hemmungen der Neuronen.

Das Gehirn, das diese Signale aufnimmt, verarbeitet, speichert oder erzeugt, kann man sich in vereinfachter Form als eine Vielzahl von miteinander verflochtenen geschlossenen Gedächtniskreisen vorstellen. Einige dieser Kreise sind mit Rezeptoren verbunden und unterliegen Umwelteinflüssen. Teile der Kreise berühren sich, hier werden logische Operationen - z. B. Vergleiche - durchgeführt. Andere Kreise führen in die peripheren Abschnitte des Nervensystems. Die Kodewörter, die sich in ihnen befinden, bestimmen letzten Endes die Bewegungen der Muskeln.

Nach anatomischen Untersuchungen hat eine vom Gehirn ausgehende Nervenbahn die Form eines sich verzweigenden Baumes. Wir können arbeitsfähige Modelle einer solchen Bauart schaffen: Es handelt sich einfach um einen Verteiler, bei dem die vorangestellte Adresse die Unbestimmtheit beseitigt, auf welche Abzweigung die folgenden Impulse zu leiten sind und sie damit zwingt, zu einem ganz bestimmten Punkt zu gehen. Ohne Adresse ist die Aufgabe unlösbar, da dann die Wahrscheinlichkeit zu groß ist, dass ein Impuls, der z. B. den Arm strecken soll, zum Beugemuskel des Halses gerät oder zu einem andern, der mit der vorliegenden Situation überhaupt nichts zu tun hat.

Den umgekehrten Weg gehen die Signale zum Gehirn. Ein Impuls, der seinen Weg bei einer Rezeptorzelle beginnt, geht auf dem Wege zum Gehirn durch Nervenknotten und sammelt dort vermutlich die Adresse seines Entstehungsortes. Wir erinnern daran, wie sich die "Fabeltiere" in den Versuchen des sowjetischen Physiologen P. Anochin verhielten. Anochin nähte beispielsweise den von der Ferse kommenden Nerv an die Kehle und umgekehrt.

Der Versuchshund verhielt sich nach dieser Operation merkwürdig: Kitzelte man seine Pfote, so hustete er, und gab man ihm einen Schluck zu trinken, so zuckte er krampfhaft mit dem Bein. Aber nach einer gewissen Zeit stimmte das Gehirn des Hundes die veränderten Adressen der Reizquellen und der Muskeln aufeinander ab, und das Verhalten des Hundes wurde wieder normal.

Man kann sich vorstellen, dass jede Kombination von Impulsen, die das Gehirn erreicht, die Adresse eines Punktes in der Hirnrinde ist: In diesen Punkt gelangt ein einzelner Impuls, während die anderen Impulse dafür verausgabt werden, diesem einen den Weg frei zu machen.

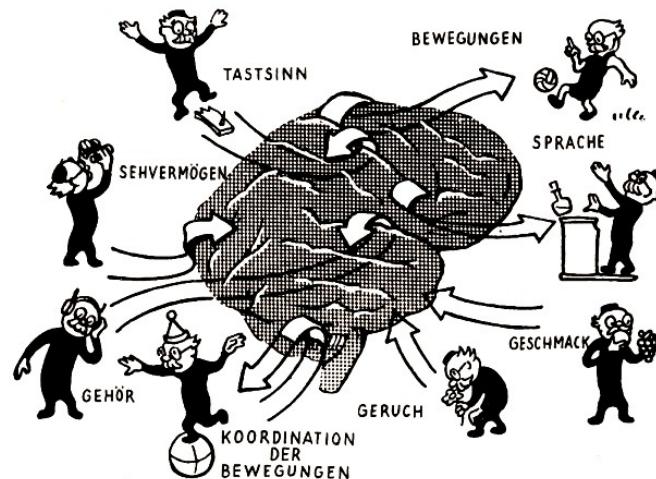


Bild 15.5.: Die Eingänge für die Nachrichten, die von den Sinnesorganen (Sehvermögen, Gehör, Tastsinn, Geruch, Geschmack) kommen, und die Ausgänge für die Befehle (Bewegungen, Sprache) lassen sich auf der Großhirnrinde ziemlich deutlich feststellen. Hier ist die Bedeutung der Signale konkret. Aber ein großer Teil der Hirnrinde bewahrt Information über Wechselwirkungen zwischen konkreten Signalen auf.

Aus Versuchen, bei denen einzelne Punkte der Hirnrinde gereizt wurden, ist bekannt, dass jeder Punkt der Hautoberfläche eine eigene Vertretung unter den Zellen der Hirnrinde hat. Nach einer Idee des Physiologen Penfield zeichnet man über die vordere Zentralfurche einen Menschen mit dicken Lippen und großen Händen:

Die Größe jedes Körperteils entspricht dabei der Größe des Gebiets in der vorderen Zentralfurche, das diesen Körperteil repräsentiert.

Aber was stellt dann der restliche Teil der Hirnrinde dar? Es handelt sich auch um eine "Karte", auf der jeder Punkt einer Kombination von Signalen entspricht, die sich das Gehirn merken kann. Dieser Teil repräsentiert Kombinationen, die mit dem Körperbau nichts zu tun haben, - verschiedene mögliche Kombinationen, die Eigenschaften der Umwelt widerspiegeln.

Wir finden hier also einen Typ des Gedächtnisses, wie er in technischen Anlagen bisher nicht benutzt wird. Bei einem technischen Speicher ist immer eine von der zu speichernden Kombination getrennte Adresse vorhanden. Auf einem Tonband sind die Adressen Zeitangaben: "Erste Minute" (Adresse) - "Tango" (Inhalt); "zweite Minute" - "kubanisches Liedchen" usw. Daher wird das Tonband voll und übervoll, selbst wenn wir nur das Schlagen eines Metronoms oder vollständige Stille aufzeichnen.

Man nehme dagegen eine lebendige Fliege! Sie hat Augen, von denen offenbar ständig Signale in das Oberschlundganglion gelangen, und dort speichert und verarbeitet die Fliege die Signale. Niemand hat je bemerkt, dass eine Fliege wegen Überfüllung ihres Gedächtnisses umgekommen oder "verrückt" geworden ist. Aber wo werden die ständig eintreffenden Kombinationen

untergebracht, wenn ihnen nur ein so kleiner Speicherraum zur Verfügung steht wie dieses Ganglion, dieser winzige Nervenknotten?

Hier zeigt sich, dass ein Gedächtnis, indem das, was gespeichert wird, die Adresse ist, nicht überfüllt werden kann. In einem derartigen Speicher werden zwei gleiche Signale (die vom gleichen Rezeptor kommen) durch Einspeicherung von zwei Impulsen in dasselbe "Gedächtnis"element aufgezeichnet. Dadurch wird er befähigt, Wiederholungen herauszufinden und den Informationsgehalt zu erhöhen.

Das Gehirn ist daher nicht mit einem Heft zu vergleichen, in das an freien Stellen Wörter eingetragen werden, sondern eher mit einem Wörterbuch, in dem das Wort nur aufgesucht und unterstrichen wird.

Bei der Betrachtung stochastischer Maschinen, deren Arbeit der des Gehirns ähnlich ist, haben wir uns davon überzeugt, dass das "Gedächtnis" einer solchen Maschine nicht nur ein Verzeichnis der Wörter, sondern auch Angaben über deren relative Häufigkeiten enthalten muss. Diese Forderung gilt auch für das Gehirn: Es muss die Wahrscheinlichkeit verschiedener Impulskombinationen abschätzen, dazu ist eine Registrierung ihrer Wiederholungen erforderlich.

Wie das im Gehirn geschieht, wissen wir noch nicht genau. Wir können aber sagen, wie ein Konstrukteur ein Modell eines nicht zu überfüllenden "Gedächtnisses" herstellen würde. Er würde eine mehrschichtige Karte aller zu speichernden Kombinationen anfertigen und von jedem Punkt nach unten zur nächsttieferen Schicht eine Übertragung "modulo  $k$ " (wobei  $k$  eine der Zahlen 2, 3, ... - der Schwellenwert - ist) anlegen.

Bei der Speicherung von mehreren Impulsen an einem Punkt würde sich dort eine "Aufwölbung" des Potentialreliefs ergeben - ungefähr ebenso wie bei der Speicherung von Ladungen auf dem Bildschirm einer elektrostatischen Speicherröhre.

Wenn die Anzahl der gespeicherten Impulse den Schwellenwert, die Zahl  $k$ , die sozusagen die Basis des vom Modell verwendeten Zahlensystems ist, überschreitet, dann wird ein Impuls zum Gedächtniselement der nächsttieferen Schicht übertragen, gleichzeitig verschwinden die in der höheren Schicht gespeicherten Impulse. Das "Potential" des unteren Elements vergrößert sich dabei also um eine Impulseinheit.

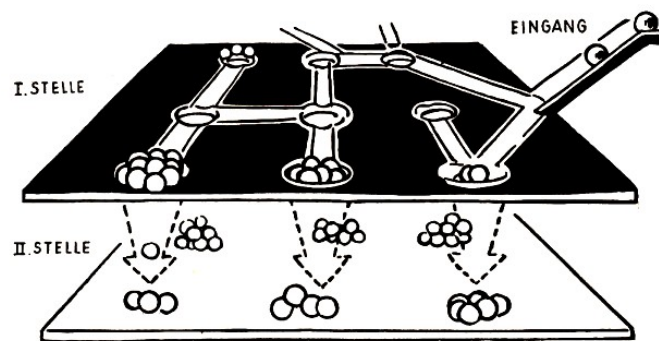


Bild 15.6.: Modell eines mehrstelligen Adressenspeichers. Jeder Punkt des Speicherfeldes entspricht einer bestimmten Adresse. Die Haufen der Kügelchen symbolisieren das Potentialrelief, das die Häufigkeiten widerspiegelt, mit der einzelne Punkte von einem Impuls erreicht wurden. Wenn die Stärke des Potentials den Schwellenwert eines der Elemente übersteigt, so gelangt ein einzelner Impuls in die nächsttieferen Stelle des Speichers, die übrigen gespeicherten Impulse verschwinden.

Dieses Prinzip ist uns gut bekannt, denn so arbeiten die Zähler z. B. einer elektronischen Rechenmaschine. Die früher erwähnte Triggerkette arbeitet im Dualsystem (d. h. modulo 2), und das Gehirn? An Neuronen durchgeführte Messungen legen die Vermutung nahe, dass die Zähler im Gehirn dezimal arbeiten.

Obwohl das Potential eines Nervenimpulses nur 1 mV beträgt, sind nämlich 10 mV erforderlich, um den Widerstand der Synapse zu überwinden.<sup>64</sup>

In diesem Sinne kann man das Gehirn also eher mit einem dezimalen Rechenbrett als mit einer im Dualsystem operierenden elektronischen Rechenmaschine vergleichen.

Die Lösung unseres Konstrukteurs birgt übrigens viele Schwierigkeiten in sich. Es bestehen ernsthafte Gründe zu der Annahme, dass die Karten, die Potentialreliefs, die er in den verschiedenen "Etagen" des Gedächtnisses erhält, Karten des Stillen Ozeans sehr ähnlich sehen: Riesige leere Flächen, die den nie auftretenden Signalkombinationen entsprechen, werden wie der eintönige Meeresspiegel nur hin und wieder von winzigen Inseln unterbrochen, die mögliche Signalkombinationen berücksichtigen - die Information, die das Gehirn gewöhnlich erhält, ist nämlich unwahrscheinlich redundant.

Ein Konstrukteur, dem man wegen jedes Elements, das in seiner Konstruktion überflüssig ist, Vorwürfe macht, darf nicht so handeln. Er vermutet, dass auch die Natur ökonomisch vorgegangen ist, obwohl es sie nichts kostet, Neuronen herzustellen, denn sie entstehen durch Teilung. Aber der Organismus muss jede Gehirnzelle das ganze Leben lang ernähren, daher sind die Organismen im Wettstreit mit den anderen Organismen ausgelesen werden, bei denen die Gehirnzellen, die die verschiedenen wesentlichen Einzelheiten des Lebens und der Welt wiedergeben, soviel leisten, wie irgend möglich ist. Was tun?



Bild 15.7.: Deises "Penfield-Menschlein" stellt die Zugehörigkeit der Neuronen in der vorderen Zentralfurche zu Rezeptoren in den einzelnen Körperteilen dar.

Erinnern wir uns an das "Penfield-Menschlein": Warum ist es so dicklippig und warum enden seine Finger in so großen Polstern? Liegt das nicht daran, dass die Tastsignale der Lippen und der Fingerspitzen sehr ausführlich und verschiedenartig sind?

Erinnern wir uns an die Karten von Hauptstädten, die man für Touristen herausgibt, an die Miniaturen mittelalterlicher Handschriften und sehen wir uns schließlich die Abbildungen dieses Buches kritisch an.

Überall finden wir ein Abweichen von einem einheitlichen Maßstab zugunsten der Bedeutung. Auf einer Touristenkarte sind das Zentrum der Stadt, ihre Denkmäler, Theater, Restaurants und Hotels, kurz alle Gebäude und Orte, die den Touristen interessieren können, groß und detailliert dargestellt, die Wohnblöcke und Betriebe dagegen klein und in allgemeinen Zügen.

Ein mittelalterlicher Maler stellte seinen Helden dreimal so groß dar wie dessen Diener: Am Helden konnte man Einzelheiten der Kleidung und der Rüstung erkennen, und daneben prangten winzige Häuschen, Bäumchen und verschiedene Leutchen, die für das Dargestellte eine geringere Bedeutung haben. Heute ist ein Maler an die Gesetze der Perspektive gebunden, aber er tut im Grunde genommen genau das gleiche, indem er einen Standpunkt wählt und die Helden passend über das Bild verteilt:

---

<sup>64</sup>G. Gopfert: Steuerung und Regelung im Zentralnervensystem Sammelband: "Regelungsvorgänge in der Biologie". R. Oldenbourg-Verlag. München 1956.

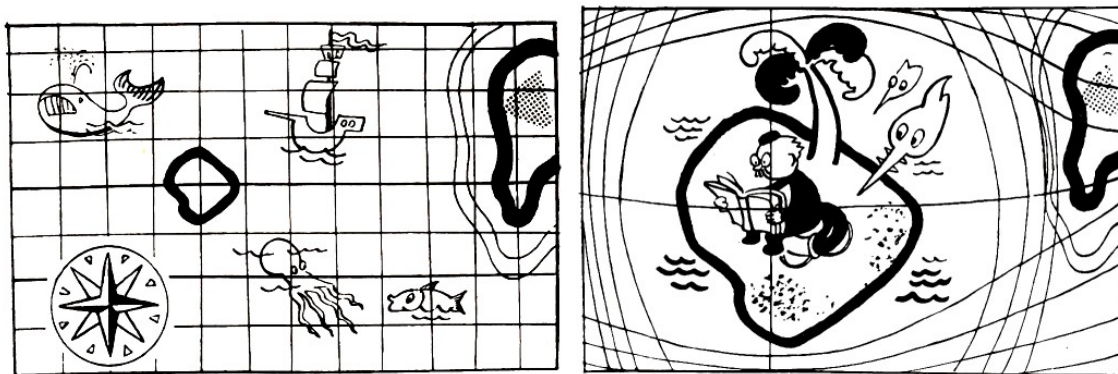


Bild 15.8.: Eine Änderung der Interessen oder des überblickten Lebensbereiches findet in einer Reformation der entsprechenden Karten seinen Ausdruck, die mit der Deformation des Gradnetzes einer geografischen Karte verglichen werden kann.

Das Wichtigste kommt in den Vordergrund, wo man es größer und eingehender darstellen kann. während das Zweitrangige in den Hintergrund, in die Tiefe kommt, wo alles nur in großen Zügen angedeutet wird. Ein mit den Automaten vertrauter pedantischer Ingenieur oder ein Anatom wird vielleicht darüber schimpfen, dass der lustige Zeichner - auf ausdrücklichen Wunsch des Verfassers - die Geräte und Teile des Organismus in unserem Buch nicht so dargestellt hat, wie sie wirklich sind, sondern so, dass man ihr Wesen besser verstehen kann.

Die Karte, die die Interessen eines Neugeborenen wiedergibt, ist eine ziemlich einfache Karte, in der augenscheinlich die Brust der Mutter den ganzen Vordergrund einnimmt, nur am Rande tauchen verschiedene leuchtende, klappernde und sich bewegende Dinge auf. Obwohl Augen und Gehirn bei einem Kleinkind genauso gebaut sind wie bei einem Erwachsenen, nimmt es nicht mehr wahr.

Am Beginn der geistigen Entwicklung des Kindes ist noch keine große Informationsmenge vorhanden: Fast alle im Gehirn eintreffenden Nachrichten sind neu und können daher nicht im Hinblick auf ihren Wert, ihre Redundanz usw. beurteilt werden. Wie oft stellen Eltern, die ihre Kleinen zum ersten Mal in den Zoo geführt haben, bei der Rückkehr fest, dass die Spatzen und eine zufällig vorbeigelaufene Katze den größten Eindruck auf die Kinder gemacht haben: Die Elefanten, die Tiger, die Kamele und die anderen exotischen Lebewesen sind als nicht erkennbares und scheinbar sinnloses Rauschen kurzerhand aus dem Gedächtnis verdrängt worden.

Ihre Bilder erinnerten an nichts Bekanntes, insbesondere an keine Handlung. Das Gehirn hat aber wie jedes Signalsystem die Aufgabe, nach einer Beurteilung der jeweiligen Situation eine entsprechende zweckmäßige Handlung anzuordnen.

Die ersten zweckmäßigen Umwandlungen von Nachrichten in Befehle entwickeln sich, wie es scheint, im Gebiet der Zentralfurche, einer tiefen Falte, die quer zu beiden Hemisphären des Gehirns verläuft. In diesem Gebiet entdeckte der russische Gelehrte W. A. Bjez (1834-1894) (für mikroskopische Maßstäbe) relativ große Zellen auf Bahnen, die das sensorische Feld, das Hautreize speichert und verarbeitet, mit motorischen Feldern verbinden.

In den Kodewörtern, die im Gebiet der Zentralfurche zirkulieren oder anders gespeichert sind, sind zweckmäßige Übergänge von Nachrichten des Tastsinns zu Befehlen für die Bewegung fixiert.

Ebensolche geregelten logischen Beziehungen entwickeln sich ausgehend von der Zentralfurche mit den darunter liegenden Lappen, wohin die Geschmackswahrnehmungen gelangen, ferner über die Sylvische Furche mit den Schläfenlappen, dem Feld, in dem akustische Reize verar-

beitet werden, und schließlich mit den Hinterhauptlappen, wobei die visuellen Informationen nach und nach in den allgemeinen Verarbeitungsprozess einbezogen werden.

Die vermutlich strukturell gespeicherten Programme, die im (phylogenetisch alten) Stammhirn, und zwar im sogenannten "Thalamus" und "Hypothalamus", angelegt sind, bestimmen primäre Kriterien für die Arbeit der Hirnrinde, nach denen gehaltvollere Information der redundanten Information vorgezogen wird und wahrscheinliche Schlüsse den weniger wahrscheinlichen.

Die Information, die in den subcortikalen Programmzentren enthalten ist, liefert die notwendige Grundlage für das Sammeln von Informationen, indem sie festlegt, was nützlich und was schädlich ist, was man suchen und was man fürchten muss.

Auf diese Weise entsteht ein inneres Modell der Umwelt im Gehirn, an dem der Organismus seine Versuche, seine Auswahl zweckmäßiger Verhaltensweisen schneller und mit geringeren Verlusten durchführen kann als in der Umwelt.

Ohne Unterlass beantworten diese Zentren "Anfragen" anderer Gehirnteile (ebenso wie die Befehlstabelle einer Turing-Maschine deren Verhalten steuert) und ermöglichen so das Erarbeiten sekundärer Verhaltenskriterien und zweckmäßiger Verhaltensweisen in diesen Teilen. Wie erkennt der Säugling an Geschmacksreizen, akustischen oder visuellen Wahrnehmungen, was ihm Sattheit und Wärme oder umgekehrt Hunger und Kälte bringt?

Wenn die Nachrichten, die von den Sinnesorganen einlaufen, von den subcortikalen Zentren "instinktiv" in Befehle umgearbeitet werden, so entsteht ein Zusammenhang, der zunächst noch wenig gesichert ist, der aber von erfolgreichen, zum Ziel führenden Wiederholungen bestätigt wird. Die erhaltene Information wird von der Hirnrinde Transformationen unterzogen, die den Sinn nicht ändern; die gehaltvolleren Darstellungen der Information werden ausgewählt, und das Bedürfnis nach Bestätigung der erarbeiteten Kenntnisse und Verhaltensweisen führt zum Experiment, zu Handlungen, die darauf gerichtet sind, die erhaltenen oder ausgedachten Informationen zu überprüfen.

Die belanglosen Einzelheiten werden dabei ausgesondert und verschwinden nach und nach; sie werden vergessen. Nach unlängst durchgeführten Berechnungen von W. McCulloch vergisst das Gehirn an einem halben Tag im Mittel die Hälfte der bei ihm einlaufenden Nachrichten. Da die Möglichkeit besteht, aus den abstrakten Verallgemeinerungen und wenigen gespeicherten Anhaltspunkten viele konkrete Einzelheiten des betreffenden Sachverhalts logisch herzuleiten, kann das Gehirn das Vergessene teilweise reproduzieren.

McCulloch nimmt an, dass durchschnittlich 5 Prozent des Vergessenen später, wenn es benötigt wird, reproduziert werden kann.

Diese Besonderheit des Gedächtnisses können wir leicht feststellen, wenn wir uns z. B. an einen halb vergessenen Namen erinnern. Ist ein Name ungewöhnlich, so ist es schwer, sich ihn einzuprägen, aber je gewöhnlicher er ist, desto schwerer ist es, sich auf ihn zu besinnen. Die Nachricht über ihn ist längst umgearbeitet worden, und im Gedächtnis werden nur die gehaltvollen allgemeinen Merkmale aufbewahrt, die ihn von anderen Namen unterscheiden.

Eine der Erscheinungen, die verschiedene seelische Störungen kennzeichnen, ist die Hypermnese, eine Verschärfung des Gedächtnisses. Der Mensch beginnt sich mit überraschender Genauigkeit an Ereignisse zu erinnern, die er, wie es schien, hoffnungslos vergessen hatte. Eine nicht sehr fleißige oder begabte Medizinstudentin, die an Malaria erkrankt war, zitierte im Fieber aus dem Kopf Seite für Seite eines Anatomielehrbuchs; nach ihrer Genesung waren ihre Kenntnisse in diesem Fach ziemlich schwach.

Als wahrscheinliche Ursachen für diesen Effekt sieht man eine Abschwächung der Faktoren an, die für das Vergessen verantwortlich sind (z. B. das Zurückdrängen redundanter bzw. in den gegenwärtigen Umweltverhältnissen unwesentlicher Informationen in tiefere -schwerer zugängliche Teile des Gedächtnisses), ferner die erlebnismäßige Zurückversetzung in frühere Altersstufen, bei der das damals benutzte Bezugs- und Begriffssystem wiederhergestellt wird, das Ausschalten des Bewusstseins für die Gegenwart und eine gesteigerte Bereitschaft, unvollständige Informationen als vollständig anzusprechen (Nachlassen der Kontrolle).

In der letzten Zeit wurde experimentell durch eine Reizung der Hirnrinde mit schwachem elektrischem Strom eine künstliche Hypermnese erzeugt. Einige begeisterte Leute sahen hierin eine Methode zur Steigerung der geistigen Fähigkeiten des Menschen. Nach ihrer Meinung wird sich der Mensch der Zukunft ständig mit Hilfe einer speziellen Apparatur im Zustand der Hypermnese halten und in der Hypnose lernen.

Diese Phantasie hat keine ernsthafte Grundlage: Die Hypermnese ist unbedingt ein pathologischer Prozess, sie erschöpft das Nervensystem und liefert keine irgendwie nützlichen Ergebnisse, da wir an der Arbeit des Gehirns gerade die Fähigkeit zur Abstraktion und zum kritischen Denken und nicht das rein "mechanische" Erinnern schätzen.

Da in der Hypermnese Nachrichten zutage treten, die der Mensch als völlig Gesunder erhalten, aber vergessen hat, kann man annehmen, dass im Gehirn überhaupt bedeutend mehr Informationen aufbewahrt werden als die, mit denen wir gewöhnlich operieren und derer wir uns bewusst sind.

Diese Tatsache und zahlreiche andere Fakten begründen die Hypothese, dass die Fixierung von Gedächtnisinhalten im Gehirn nicht allein auf der Basis geschlossener Neuronenkreise, in denen Kodewörter zirkulieren, vor sich geht.

Diese Form dürfte vielmehr dem sogenannten Kurzzeitgedächtnis vorbehalten sein, in dem beispielsweise Zwischenergebnisse beim Kopfrechnen gespeichert werden, während das langfristige Gedächtnis wahrscheinlich auf molekularen Strukturen (ähnlich der Speicherung der Erbinformation durch Nukleinsäuren) innerhalb der Nervenzellen beruht.

Gestützt wird diese Hypothese z. B. dadurch, dass von einem Elektroschock, bei dem die elektrische Aktivität der Neuronen stark gestört wird, nur das Kurzzeitgedächtnis beeinträchtigt wird.

"Das Denken leitet aus einzelnen Dingen das Allgemeine her", sagte schon der mittelalterliche Gelehrte Ibn Sina (Avicenna).

Die wertvolle Fähigkeit des Gehirns, den Informationsgehalt zu erhöhen, rettet erstens jedes Geschöpf, das ein Gehirn mit dieser Fähigkeit besitzt, vor einer Überfüllung des Gedächtnisses durch die ständig von den Sinnesorganen eintreffenden Informationsströme. Der Vergleich dieser Ströme mit inneren Informationen ermöglicht es, aus den einlaufenden Informationen nur jene auszuwählen und zu speichern, die eine Unvollständigkeit oder Unsicherheit der inneren Informationen beseitigen.

Über diese Besonderheit des Erkennens dachten bekanntlich schon die antiken Sophisten nach und sie kamen letzten Endes zu der sinnlosen Schlussfolgerung, dass ein Erkennen überhaupt nicht möglich sei: "Entweder kennen wir das, was wir suchen, schon, und dann lernen wir nichts, oder wir kennen es nicht, und dann lernen wir auch nichts, da wir nicht wissen, was wir suchen."

Blind geborene Menschen, die als Erwachsene das Augenlicht erhielten, haben, als sie über ihre Empfindungen erzählen konnten, berichtet, dass sie keinen Gegenstand visuell erkennen

konnten, solange sie ihn nicht mit den Händen abgetastet hatten. Die Ansicht, dass die Strahlen des Sehens vom Auge ausgehen, entstand nicht zufällig - in diesem naiven physikalischen Bild verkörpert sich die Beobachtung, dass das Erkennen kein passives Aufnehmen, sondern ein aktives Verarbeiten von Informationen, die von eventuell mehreren Sinnesorganen gleichzeitig einlaufen, ist.

Diese Fähigkeit ermöglicht es zweitens, durch einen Übergang vom Konkreten zum Allgemeinen und dann wieder zum Konkreten eine neue unvollständige Information, eine Hypothese, zu finden, deren Richtigkeit dann durch Versuche bestätigt oder widerlegt wird.

Diese Fähigkeit ermöglicht drittens, den weiteren Ablauf bestimmter Ereignisse vorausszusehen, Ziele zu stellen, die in Abhängigkeit von Erfolg oder Misserfolg geändert werden.

Die Stirnlappen des Gehirns liegen am weitesten von den Stellen entfernt, an denen Nervenbahnen in die Hirnrinde eintreten, um Signale ihr zuzuleiten oder von ihr in andere Gehirn- und Körperteile abzuleiten.

In die Stirnlappen werden die Informationen allmählich zurückgedrängt, die die am weitesten verallgemeinerten und gehaltvollsten Beziehungen und Zusammenhänge zwischen den Eingangsinformationen widerspiegeln. Die logische Arbeit dieser Teile bestimmt die allgemeine Lebensstrategie des Tieres oder des Menschen; von jeder Klasse von Situationen, die irgendein Merkmal gemeinsam haben, und jeder Verhaltensweise, die das Gehirn ausgearbeitet hat, die aber noch nicht ausgeführt worden ist, existiert dort eine Verbindung, eine Assoziation, zu dem, was schon in einer ähnlichen Lage geschehen ist sowie zu den damaligen Ergebnissen.

Diese Ergebnisse werden mittels der in den subcortikalen Zentren realisierten primären und der im Cortex erarbeiteten und gespeicherten sekundären Verhaltenskriterien geprüft, und diejenigen, die diesen Kriterien entsprechen, werden als Ziele ins Auge gefasst. Zum Erreichen des gestellten Ziels wird dann eine erfolversprechende Verhaltensweise realisiert.

Eine Katze, die einen Sperling jagt, versteckt sich, schleicht, erstarrt vor dem Sprung und springt schließlich; aber sie braucht den gefangenen Sperling nicht aufzufressen, wenn sie satt ist.

Offensichtlich existiert das Ziel, das hierbei das Fangen eines Sperlings ist, in ihrem Gehirn getrennt von den Informationen, die ihrem Hungerbedürfnis entsprechen. Wenn dieses Ziel die Katze "ergriffen" hat, dann bestimmt es die Arbeit des Gehirns und seine Verhaltenskriterien: Die Katze sieht und hört nichts als das Objekt ihrer Jagd.

Am Anfang der dabei aktiven, von der Hirnrinde über das Rückenmark zu den Muskeln führenden Nervenbahnen werden die Kodewörter der stereotypen Programme für das Schleichen und Springen bereitgestellt. Alle tiefer liegenden Abschnitte des Nervensystems sind diesem inneren Ziel unterworfen, das nicht mehr durch die Struktur des Stammhirns gegeben wird, sondern durch Signalkombinationen, die in den Stirnlappen zirkulieren.

Das ist ein wesentlicher Schritt vorwärts in der Entwicklung von den strukturell festgelegten Verhaltenskriterien verhältnismäßig einfacher Automaten zu den bewussten mehr oder minder abstrakten Zielen des Menschen.

Friedrich Engels schrieb: "Alle Verstandstätigkeit: Induzieren, Deduzieren, also auch Abstrahieren (Didos<sup>65</sup> Gattungsbegriffe: Vierfüßler und Zweifüßler), Analysieren unbekannter Gegenstände (schon das Zerbrechen einer Nuss ist Anfang der Analyse), Synthesieren (bei tierischen Schlauheitsstückchen) und, als Vereinigung beider, Experimentieren (bei neuen Hindernissen und in fremden Lagen) haben wir mit dem Tier gemein. Der Art nach sind ... alle Mittel der

---

<sup>65</sup>So hieß der Hund von Friedrich Engels



wissenschaftlichen Forschung, die die ordinäre Logik anerkennt - vollkommen gleich beim Menschen und den höheren Tieren. Nur dem Grade (der Entwicklung der jedesmaligen Methode) nach sind sie verschieden."<sup>66</sup>

Wie Versuche des Physiologen Karl Spencer Lashley (geb. 1890) zeigten, besitzen sogar Ratten eine primitive Fähigkeit zum Abstrahieren. Lashley setzte eine Ratte vor einen Schirm mit zwei Öffnungen, die von beweglichen Klappen, auf denen geometrische Figuren dargestellt waren, verdeckt wurden. Hinter der einen Öffnung befand sich ein Fangnetz, hinter der anderen Futter.

Er brachte der Ratte zunächst bei, dass sich das Futter immer hinter einer Klappe befindet, auf die ein Dreieck mit einer nach oben weisenden Spitze gezeichnet war. Danach wechselte Lashley die Figuren auf den Klappen aus. Unter anderem verwendete er Dreiecke verschiedener Dimensionen und Farben:

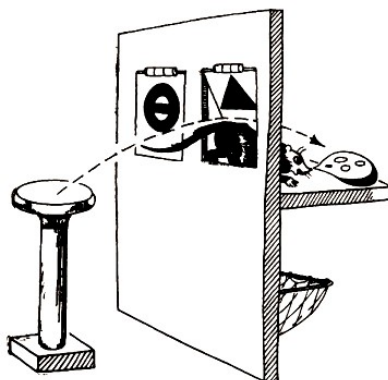


Bild 15.9.: In den Versuchen des Physiologen Lashley zeigten Ratten ein feines Unterscheidungsvermögen für Zeichen, die den Weg zum Futter wiesen, von Zeichen, die im voraus einen Misserfolg ankündigten.

Die Ratte sprang nur durch jene Öffnung, die von einer Klappe verdeckt wurde, auf der ein beliebiges Dreieck, das aber eine nach oben weisende Spitze besaß, dargestellt war. Das zeigt, dass in ihrem Gehirn mit dem angestrebten Futter nicht die Kodierung eines konkreten Dreiecks (etwa eines großen blauen) assoziiert war, sondern die Kodierung einer abstrakten geometrischen Figur, eines Dreiecks, das eine nach oben weisende Spitze hat.

Ähnliche Ergebnisse lieferten Versuche, bei denen Tiere auf Melodien dressiert wurden. Spielte man die gelernte Melodie etwa zwei Tonstufen höher als gewöhnlich, so entstehen andere Tonkombinationen als die, die das Tier gelernt hat, und trotzdem erkennt das Tier die Melodie. Das Signalsystem eines Tieres reicht jedoch nicht aus, um all die zahlreichen Zusammenhänge zu erfassen, die in der Natur existieren und durch höhere Abstraktionen im menschlichen Gedächtnis widergespiegelt werden können. Vielleicht entwickelt eine alte Ratte, die sich aus vielen verschiedenen Fallen glücklich herausgearbeitet hat, gegen Ende ihres Lebens im Gedächtnis irgendwelche allgemeinen Vorstellungen über Typen von Fallen.

Aber diese Vorstellungen treffen niemals das Hauptsächliche und Wesentliche, erstens, weil die Ratte selbst nicht fähig ist, Fallen zu bauen, und zweitens, weil sie, die Erfahrung von anderen und vielleicht nicht weniger klugen Ratten niemals ausnutzen kann.

Der wesentlichste Unterschied zwischen der psychischen Tätigkeit der Tiere und der Menschen besteht darin, dass der Mensch im Prozess der gemeinschaftlichen Arbeit (und natürlich auf

---

<sup>66</sup>Friedrich Engels: Dialektik der Natur, Dietz Verlag, Berlin 1952, Seite 236.

der biologischen Grundlage eines stark erweiterten Gedächtnisvolumens) die Fähigkeit entwickelt hat, Information, die im Gehirn eines jeden Menschen für sich existiert, durch Worte auszudrücken. Das bedeutet:

Zumindest den wichtigsten Kodewörtern im Gehirn, die Begriffe auf den verschiedenen Verallgemeinerungsstufen darstellen, ist ein kleines Programm für Bewegungen des Sprechapparats zugeordnet, bei dessen Realisierung der Mensch ein Wort ausspricht, außerdem eine grammatische Charakterisierung, die den logischen Zusammenhang bei der Übermittlung von Informationen sichert.

Das primäre Kodewort, das den Begriff widerspiegelt, wird damit zu einer semantischen (inhaltlichen) Charakterisierung des, entsprechenden Wortes, die es ermöglicht, von einem gehörten oder im Gedächtnis aufgetauchten Wort zu weitreichenden inneren Zusammenhängen überzugehen, die im Gehirn erarbeitet und gespeichert sind.

Die Sprache entstand im Prozess der Menschwerdung bei unseren ersten menschenähnlichen Vorfahren; dabei erhielten die einzelnen Lautkombinationen (Wörter) ihre Bedeutung weitgehend zufällig. Grundlage dieses Prozesses bildete die gemeinschaftliche Arbeit, die die Sprache zur Notwendigkeit werden ließ.

Im Kopf aller Menschen einer Sippe, eines Stammes oder einer Völkerschaft verbanden sich die gleichen Sprechprogramme mit den gleichen Kodewörtern, mit gleichen semantischen Charakterisierungen. Ein neues Mitglied solcher Gemeinschaften, das geboren wurde oder von anderen Gruppen hinzukam, hörte jedesmal, wenn es einen Gegenstand oder eine Erscheinung erkannte, die gleichen Laute der ihm fremden Sprache.

Sie wurden von seinem Gehirn den gleichen Begriffen zugeordnet, denen sie bei den anderen assoziiert waren. Der Neuling kontrollierte dann die Richtigkeit seiner Spracherkenntnis durch Versuche in ersten noch ungeschickten Gesprächen und beseitigte dabei Fehler und Unbestimmtheiten (durch Fragen).

Mit dem Entstehen hinreichend verbreiteter Sprachen werden die Möglichkeiten des Erkennens, Experimentierens und Kontrollierens der einzelnen Gehirne vereint; durch den Informationsaustausch werden die Signalsysteme der Menschen weit leistungsfähiger; sie sind in der Lage, die Zusammenhänge und Beziehungen in der Realität sehr viel genauer und gehaltvoller widerzuspiegeln und dementsprechend wesentlich zweckmäßiger zu handeln.

Anfangs sichert dieses Handeln nur die Selbsterhaltung des Menschen und die Erhaltung seiner Art, später wird es abstrakten und speziellen Zielen untergeordnet, die sich die Menschen gemeinschaftlich stellen. Pawlow nannte diesen wichtigsten Zuwachs der menschlichen Psyche das zweite Signalsystem, das nur der Mensch besitzt.

Die Information, die man über das zweite Signalsystem erhält, wird im Prozess des gesellschaftlichen, kollektiven Experimentierens geschaffen. Der Mensch beobachtet die Natur nicht nur, sondern er verändert sie auch; er gestaltet den Ablauf von immer mehr Naturerscheinungen für sich zweckmäßig, er unterwirft sie seinen Bedürfnissen.

In diesem Prozess entdeckt er Eigenschaften der Welt, die einem passiven Beobachter für immer verborgen geblieben wären. Und da er das nicht allein tut, sondern im Kollektiv, in der Gesellschaft, kann jedes Ergebnis seiner persönlichen Erfahrung mit den Ergebnissen der Erfahrung von anderen Menschen in Einklang gebracht werden; er kann auf dem aufbauen, was vorangegangene Generationen hinterlassen haben.

Das zweite Signalsystem des Menschen ist ein Teil des Gesamtsignalsystems der Menschheit, das unsterblich ist und (dank der verschiedenen technischen Mittel, wie der Schrift, des Buch-

drucks und der Foto- und Kinotechnik) eine unbegrenzte Kapazität besitzt. Eine einfache Analogie kann bis zu einem gewissen Grad die Kraft veranschaulichen, die den Wörtern, den "Signalen der Signale" innewohnt.

Gehen Sie in einer klaren Nacht hinaus ins Freie und schauen Sie zum Himmel. in das funkelnde Chaos der Sterne.

Können Sie sagen, was sich seit der letzten Nacht am Himmel verändert hat? Natürlich nicht. Es scheint unwahrscheinlich, dass das überhaupt jemals zu klären ist. Aber da beginnt Ihr Blick irgendwelche Besonderheiten in der Verteilung der Sterne zu erfassen, er bemerkt Anhäufungen von Sternen, Sternbilder. Dieser natürliche Prozess der Abstraktion wird mit jeder neuen Etappe schwieriger, solange Sie nicht den Sternbildern Namen geben oder, was noch besser ist, von anderen die traditionellen, allgemein gebräuchlichen Namen übernehmen. Und der Himmel beginnt mit Ihnen zu sprechen.

Er teilt Ihnen immer wieder mit, dass er derselbe ist, dass die Frist eines menschlichen Lebens zu kurz ist, um irgendwelche wesentlichen Änderungen in der Verteilung dieser leuchtenden Punkte am Firmament festzustellen. Mit der Zeit offenbart er Ihnen die unauffälligen Verletzer seiner Ordnung, die Planeten, und gibt Ihnen einen ersten Hinweis auf die verborgenen Geheimnisse seines wirklichen und nicht nur scheinbaren Lebens.

Die Natur zeigt uns manchmal an sehr überzeugenden Fällen die wichtige Rolle des zweiten Signalsystems im Leben des Menschen.

Vor gar nicht langer Zeit, im Jahre 1956, wurde in Nordindien ein Kind entdeckt, das Wölfe in den Dschungel geschleppt hatten und das dort außerhalb des Einflusses erwachsener Menschen wie der Held Tarzan aus den Romanen des Schriftstellers Berrous aufgewachsen war. Obwohl alle Sinnesorgane und auch das Gehirn solcher Kinder, die von Tieren aufgezogen wurden, vollkommen in Ordnung sind, entdeckt man in ihrem Verhalten fast keine menschlichen Züge. Sie kennen die Gewohnheiten der Tiere und Vögel des Waldes und ahmen diese ausgezeichnet nach, können aber nicht mehr in die normalen Geleise der menschlichen Existenz finden. Letzten Endes sterben sie wie wilde Tiere in der Gefangenschaft. Das romantische Bild des klugen, edlen und einsamen Beherrschers des Dschungels, Tarzan, erweist sich als Phantasieprodukt eines Schriftstellers.

Betrachten wir ein anderes Beispiel. In Moskau lebt und arbeitet Olga Skorochodowa als wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Defektologie. Diese Frau kann weder sehen noch hören, sie ist der wichtigsten Kanäle, durch die wir Information erhalten, beraubt. Nur der Tastsinn gibt ihr die Möglichkeit, mit anderen Menschen Kontakt aufzunehmen. Und dennoch gelangt durch diesen schmalen Kanal eine Informationsmenge in ihr Gehirn, die sie am Leben der Menschheit teilhaben lässt.

Sie hat es z. B. gelernt, Wörter zu verstehen, die man ihr mit einem Stäbchen auf die Handflächen schreibt, und sie schreibt selbst Schreibmaschine; das rettet ihre seelische Verfassung und befähigt sie zu einem normalen menschlichen Leben.

Vergleichen wir diese beiden Beispiele. Sie zeigen klar, dass das menschliche "Ich" notwendig ein Teil des gemeinsamen "Wir" der Menschen ist, dass die Persönlichkeit in der Gemeinschaft entsteht. Das seelische Leben des Menschen kann sich niemals und unter keinen Umständen selbständig entfalten, da alle seine Besonderheiten auf den Errungenschaften der Menschheit als Ganzes basieren.

Berrous, der seinen Tarzan durch Tiere aufziehen ließ, hoffte, ihn damit vor den menschlichen Mängeln zu bewahren. Aber die Information, die die Persönlichkeit des Menschen prägt, ist

nicht erblich, und ihr größter Teil besteht aus so unbestreitbaren Werten wie der Sprache, dem Verstand, der Wissenschaft und Technik, der Kunst, den Idealen. Ohne diese Werte bleibt jeder Tarzan ein Tier, das sich durch ein großes Gedächtnis auszeichnet, mit dem es aber nichts anfangen kann, weil seine persönliche Erfahrung nicht ausreicht, auch nur einen kleinen Teil der Information zu erarbeiten, die das Gehirn aufnehmen kann.

Die Signale der Sprache sind Träger einer Information, die, nachdem sie im Gehirn gesammelt worden ist, aus diesem heraustritt und damit eine selbständige Existenz erhält. Diese Information kann von jedem aufgenommen werden, der den Schlüssel zu ihrem Inhalt, die Zuordnung zwischen Wörtern bzw. Wortsystemen und Begriffen besitzt. Die Handlungen, die diese Signale erzeugen, sind gewöhnliche Bewegungen, die durch Rückkopplungen vom Gehirn kontrolliert werden können.

Diese Kontrolle kann auch "im Innern", d. h. ohne ein Aussprechen der Wörter, vollzogen werden. Damit entsteht eine neue Besonderheit, die man als Bewusstsein oder Verstand bezeichnet. Es handelt sich hier um eine Rechenschaftslegung des Gehirns vor sich selbst über den Teil der logischen Operationen, die nicht direkt mit Begriffen, sondern mit entsprechenden Wörtern ausgeführt werden.

Sie erhöht die Kontrollmöglichkeiten außerordentlich, denn sie ermöglicht einen Vergleich der logischen Operationen mit den früher hergeleiteten Regeln der Logik und auch mit den im Prozess der jahrhundertelangen Erfahrung entdeckten Grenzen ihrer Anwendbarkeit, auf die die dialektische Methode hinweist. Sie sichert die Kontinuität des Bewusstseins; im Chaos der Zusammenhänge und Wechselwirkungen bildet sich also ein beständiger Leitfaden heraus, auf den die Nachrichten des Gehirns über seine eigene Arbeit gewissermaßen aufgereiht werden.

In dem Maße, in dem unsere Erkenntnis der Realität fortschreitet, wächst die Rolle der abstrakten Begriffe, bei denen die Zusammenhänge mit den konkreten Bildern sinnlicher Herkunft verschleiert sind. Alle unsere Gradienten, Vektoren und Potentiale, Unbekannten, Veränderlichen und Ableitungen, Quantifikatoren und Operatoren, Energien, Entropien und Informationen liefern neue verallgemeinerte Schlussfolgerungen, wenn man sie Umformungen unterwirft, die offenkundig widerspruchsfrei sind.

Ihr Wert unterliegt jedoch einer regelmäßigen experimentellen Prüfung an den objektiv existierenden Zusammenhängen in der Realität, für deren Widerspiegelung sie geschaffen worden sind. Auf diese Weise entstand übrigens auch die Kybernetik selbst.

Im Laufe ihrer praktischen Tätigkeit befassten sich Mathematiker und Physiologen mit einer Untersuchung der Funktionsweise des menschlichen Organismus unter Gesichtspunkten der Regelungstheorie. Sie untersuchten die Erscheinung, dass bei einigen Erkrankungen des Nervensystems die Koordinierung der Bewegungen gestört ist: Der Kranke kann zum Beispiel keinen Bleistift vom Tisch nehmen, ohne hinzusehen. Dieser Kranke empfindet die Lage seiner Hand im Raum nicht, er weiß nicht, wie weit sie von dem Bleistift entfernt ist.

Eine analoge Erscheinung beobachtet man in der Technik, wenn eine Rückkopplung abreißt, das heißt, wenn der Mechanismus über die Übereinstimmung bzw. Nichtübereinstimmung zwischen dem vorgeschriebenen und dem wirklichen Zustand des geregelten Objekts keine Signale mehr erhält.

Bei der Formulierung des Allgemeinen in beiden Erscheinungen ließ man deren physikalische Merkmale als unwesentlich fort, operierte mit den Begriffen "Rückkopplung" und "Abreißen einer Rückkopplung" und kam zu der Hypothese: "Das Gehirn lenkt das Verhalten aller Organe unter Verwendung von Rückkopplungen."

Das war zunächst eine ziemlich unsichere Hypothese, da man bei weitem nicht alle Verhaltensweisen bzw. die Art, wie das Gehirn diese Verhaltensweisen hervorruft, untersucht hatte. Aus dieser allgemeinen Hypothese ergibt sich folgende spezielle: "Da jedes Regelungssystem unter bestimmten Bedingungen instabil werden kann und Schwingungen um einen gewissen Zustand entstehen können, muss eine derartige Instabilität im Organismus nachzuweisen sein."

Natürlich ergeben sich aus der erwähnten Hypothese noch viele andere Folgerungen, aber die Wissenschaftler machten halt und stellten einen Versuch an: Sie klärten bei einem Neuropathologen, ob die von ihnen vorausgesagte Erscheinung tatsächlich eintritt. Die Antwort war positiv, derartige Schwingungen treten im Organismus (beim sogenannten Kleinhirntremor) auf. Das bestätigte die aufgestellte Hypothese.

Mit dem Entstehen eines Systems, das fähig ist, sich bewusst Ziele zu stellen und ihre Verwirklichung anzustreben, erreicht der natürliche Automatismus seine höchste Entwicklung, und der Gegenstand der Kybernetik kann als erschöpft gelten, wenn die Prinzipien der Arbeitsweise und die Details derartiger Systeme erkannt sind. Das zur bewussten Tätigkeit fähige Gehirn kann äußerst ökonomische und exakte Methoden zur Informationsverarbeitung finden, es kann seine Kräfte mit denen Millionen anderer vereinigen, die Arbeit zweckmäßig aufteilen, und es kann künstliche Informationsspeicher und -umformer schaffen, durch die die biologischen Grenzen seiner Arbeitsfähigkeit bedeutungslos werden.

Kehren wir zu unserem beispielhaften Unwissenden zurück, der sitzt und rätselt, welches Buch er vorziehen soll, Shakespeare oder Blödsinn. Er hat einen Ausweg - er kann die Buchstaben und das Lesen erlernen (die Sprache kennt er bereits). Bei der Untersuchung des Gehirns befinden wir uns in einer schwierigeren Lage, obwohl es vielleicht nur mit zwei Buchstaben Erregung und Hemmung operiert.

Aber jedes Gehirn hat wahrscheinlich seine eigene "Sprache", die von ihm selbständig aus dem Rauschen geschaffen worden ist, und außerdem erfindet es für jede neue Nachricht ein neues inneres Kodewort.

Einige, sogar intelligente Menschen glauben heute noch, dass das Gehirn ähnlich wie ein Rundfunksender auf weite Entfernungen Nachrichten über seine Tätigkeit verbreitet und dass andere Menschen in der Lage sind, sich so zu trainieren, dass sie diese Nachrichten auffangen und verstehen können.

Das Gehirn des Menschen sendet tatsächlich elektrische Wellen aus, wie mit Präzisionsgeräten festgestellt werden ist. Allerdings ist ihre Leistung derart gering, dass es bereits einige Zentimeter vom Kopf entfernt nicht einmal mit den empfindlichsten Empfängern möglich ist, diese Wellen nachzuweisen.

Aber aus diesen Wellen kann man wenig herauslesen. Die Psychiater können an diesen "Gehirnwellen" erkennen, ob das Gehirn normal oder krankhaft auf Reize reagiert, aber es besteht keine Hoffnung, an den Gehirnwellen zu erkennen, was der Mensch im gegebenen Moment denkt.

Gehen Sie in ein Schreibbüro, in dem ein Dutzend gewandter Mädchen auf ihren Maschinen klappern, und versuchen Sie, nach dem Geräusch zu bestimmen, was sie schreiben! Im Gehirn arbeiten Milliarden von Zellen, und jede von ihnen sendet mehr oder weniger selbständig Wellen aus. Ein Buch zu lesen, dessen sämtliche Buchstaben zugleich ausgesprochen werden, ist unmöglich.

Die Aufgabe der Wissenschaft besteht natürlich nicht darin, durch eine Untersuchung der "Sprachen" aller Gehirne die Gedanken frei zu lesen, sondern darin, zu verstehen, wie diese

Sprachen entstehen und welche Eigenschaften sie besitzen.

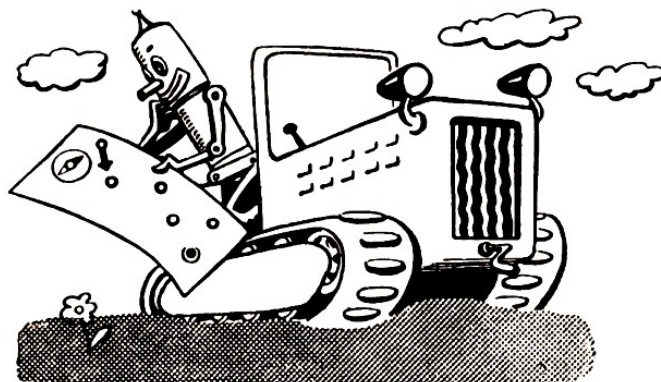
Die Psychologie und die Psychiatrie, die die Auswirkungen der Funktionsweise von gesunden bzw. kranken menschlichen Gehirnen untersuchen, sind in ihren experimentellen Mitteln äußerst beschränkt und können daher nur mit Mühe die wesentlichen Seiten der untersuchten Erscheinungen von den zufälligen unterscheiden.

Eine Prüfung von Hypothesen und Folgerungen aus diesen an Tieren ist fast unmöglich, da Tiere Sprache und Bewusstsein nicht besitzen und ihr Gehirn auf einer niedrigeren Entwicklungsstufe steht. Die Biophysik und die Physiologie des Nervensystems bringen mit ihren Versuchen an einzelnen Nervenzellen die Untersuchungen der "Sprache des Gehirns" nicht weiter.

Nur gemeinsam mit der Kybernetik können diese Wissenschaften die letzten Geheimnisse des Gehirns ergründen, indem sie in größerem Maße exakte quantitative Methoden verwenden und vor allem experimentieren.

Dazu ist besonders die kybernetische Modellierung durch elektronische und andersartige Geräte geeignet. Die Modelle sind beliebigen Messungen zugänglich und können beliebigen Bedingungen ausgesetzt werden.

## 16 Vollständige Automaten, selbständige Systeme aus zwei Maschinen: einer informationsverarbeitenden und einer handelnden



Die Erforscher des Weltalls - Ein Automat auf der Venus - Eine Kosmonautmaschine muss man auf der Erde unterrichten - Neue Züge im Verhalten von Maschinen - Biostromtechnik - Systeme aus Lebendem und Nichtlebendem - Eine Maschine errät Ihre Wünsche - Muss ein Roboter selbständig sein? - Wie wird er aussehen? - Etwas über Humor - Zum letzten Mal: Was ist Kybernetik? - Die Maschine kann nicht alles.

Fünfunddreißig Flugtage zur Venus ... Das ist kein Auszug aus den Notizen eines utopischen Schriftstellers, sondern der Gegenstand einer heute schon realisierbaren technischen Abhandlung. Eine Rakete mit gewöhnlichem chemischem Treibstoff, die für einen Flug zur Venus und für eine Landung auf der Venus berechnet ist, wird zwar sehr groß, ist aber schon jetzt durchaus zu verwirklichen.

Die Astronomen haben festgestellt, dass die Masse und die Dichte der Venus den entsprechenden Werten der Erde fast gleich sind, und einige von ihnen behaupten, dass auch die mittleren Temperaturen ihrer Oberfläche den unsrigen nahekommen.<sup>67</sup>

Wer in seiner Jugend davon träumte, wenigstens eine winzige Insel in der Südsee zu entdecken und der Menschheit zu schenken, der blickt mit heißem Herzen dorthin: Dort ist sie, die "Zweite Welt", die ihrer Entdecker und Erforscher harret.

Aber die zukünftigen "Columbuse" können vorläufig ruhig Trigonometrie pauken und mit einem selbstgemachten Ball Fußball spielen. Es ist zwar schon jetzt möglich, einen Menschen auf den "Morgenstern" zu schicken, es besteht aber keine reale Möglichkeit, ihm eine Rakete für die Rückkehr mitzugeben. Wenn nicht in den nächsten Jahren ein praktisch verwendbarer atomarer Raketenantrieb konstruiert wird, so werden die ersten, die die Oberfläche des Mars und der Venus betreten, mit Messgeräten und Sendern ausgerüstete Automaten sein.

Wir wissen, was ein Automat auf der Venus für die Wissenschaft tun soll, haben aber bisher keine hinreichend klaren Vorstellungen über die Bedingungen, unter denen er arbeiten muss. Man schickt ihn ja gerade deshalb, um diese Bedingungen zu klären. Daher ist es ausgeschlossen, einen Automaten für die Untersuchung der Venus zu bauen, der ein bestimmtes festes

---

<sup>67</sup>Am 27. August 1962 wurde in den USA die Venussonde "Mariner II" gestartet, die nach 109 Tagen (am 14. Dezember 1962) in rund 35000 km Entfernung an der Venus vorbeiflog. Die Messungen ergaben u. a., dass die Oberflächentemperatur der Venus sowohl auf der Tagseite als auch auf der Nachtseite bei über 300°C liegt.

Programm besitzt.

Der Gedanke, kosmische Kundschafter auf der Venus von der Erde aus zu steuern und ihnen die Augen, Ohren und Hände des erfahrenen und kaltblütigen Menschen zu verleihen, der auf der Erde am Schaltpult sitzt, ist verlockend. Aber die Entfernung, die die Funkwellen überbrücken müssen, beträgt im günstigsten Fall 40 Millionen Kilometer, im ungünstigsten sind es volle 300 Millionen.

Zwischen zwei und siebzehn Minuten braucht ein Funksignal, um diese Entfernungen zu überbrücken.

Da die Funksignale sich mit Lichtgeschwindigkeit, also der universellen Höchstgeschwindigkeit ausbreiten, besteht keine Aussicht, diese Zeiten zu verkürzen.

Eine Anlage, die auf eine Gefahr hin erst nach etwa einer halben Stunde mit einer schützenden Handlung reagiert, hat keine Chancen, in einer unbekanntem Umgebung zu bestehen. Jeder Spalt, jeder Regenguss, jeder locker überhängende Stein, alles droht, das wichtige, kostspielige Unternehmen zum Scheitern zu bringen. Die Sende- und Empfangsbedingungen auf der Strecke Venus-Erde-Venus sind nicht konstant:

Sie hängen von den Rotationen der beiden Planeten, von ihren Stellungen auf den Umlaufbahnen um die Sonne und von den von der Sonne hervorgerufenen Magnetstürmen ab. Daher muss man einen kosmischen Kundschafter bauen, der sich selbst steuert. Nur allgemeine Aufgaben und gesammelte Informationen werden über die interplanetare Funkverbindung übertragen, wobei sie zum Schutz gegen Störungen mehrfach wiederholt werden. In den speziellen operativen Entscheidungen muss die Maschine selbständig sein.

Viele Projekte beweglicher kosmischer Kundschafter beruhen auf phantastischen Annahmen. In Zeitschriften zeichnet man meist ein mächtiges Fahrzeug, das sich auf Raupenketten fortbewegt, mit Sonnenbatterien bedeckt ist, eine leistungsfähige elektronische Maschine zur Steuerung sowie eine Fülle von Messgeräten mit sich führt und außerdem eine Funkstation zur Kommunikation mit der Erde besitzt.

Aber elementare Rechnungen zeigen: Ein solches Fahrzeug bewegt sich nicht von der Stelle. Die heute existierenden Sonnenbatterien und die Akkumulatoren, die die Energie für die Nacht und trübes Wetter speichern, können sich selbst nicht wegschleppen.

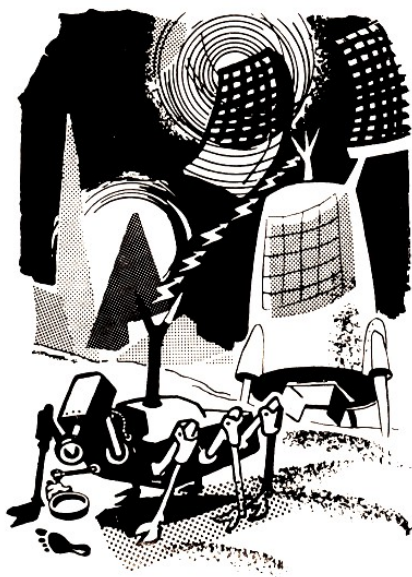


Bild 16.1.: Ein Automat kann auf der Venus viel Interessantes entdecken ...

Und anstelle eines gewaltigen Fahrzeugs zeichnet sich in den Skizzen eine seltsam bekannte Konstruktion ab: ein kleiner fester Körper, der einen Akkumulator, eine Empfangs- und Sendestation auf Halbleiterbasis und ein kleines Signalsystem enthält; ein kleiner beweglicher Kopf mit Fühlern, einem Block von Messgeräten, einem Mikrophon und einem Fernsehauge: sechs lange dünne federnde Beine, die von Elektromotoren bewegt werden. Das ist alles.

Das komplizierte "Elektronengehirn", die breiten Flügel der Sonnenbatterien, die großen Akkumulatoren und die starke Funkstation für die Verbindung mit der Erde müssen in der letzten Raketstufe bleiben, die auf der Venus weich gelandet ist.



Diese gebrechliche lustige Spinne mit einer Masse von ungefähr 10 kg kann sich etwa anderthalb Stunden selbständig fortbewegen und die notwendigen Untersuchungen durchführen. Dann muss sie zur Rakete, ihrer Behausung, zurückkehren, die "Futterkrippe" finden und sich wie die Schildkröten von Grey Walter mit elektrischem Strom aus den Vorräten stärken, die die Sonnenbatterien gesammelt haben.

Ihre Leistung beträgt ungefähr 60 W. Ihr Körper ist mit einer dünnen, elastischen Haut überzogen, die die Spinne aufblasen kann, um kleine Wasserhindernisse zu überwinden.

Ungefähr 15 W der Gesamtleistung müssen allein dafür aufgewendet werden, die Messergebnisse in Form von Impulsserien, d. h. ständigen Strömen von Nullen und Einsen, aus dem "Messkopf" der Spinne zum "Gehirn" in der Rakete zu schicken und Impulsserien vom "Gehirn" zu empfangen und durch Steuerung der Motoren in Aktionen umzusetzen.

Die Beziehung zwischen den abgegebenen und den vom Gehirn empfangenen Signalen bestimmt offenbar das Verhalten der Spinne unter den verschiedenen Bedingungen. Eine Unterbrechung eines dieser Informationsströme führt ebenso wie eine Unterbrechung ihrer "Ernährung" zum Zusammenbruch der Maschine, zum Mislingen des Experiments.

Eine derartige Maschine mit "nach außen verlegtem Gehirn" hat der Verfasser dieses Buches für das Polytechnische Museum in Moskau entwickelt. Da es auf der Venus noch keine Forschungsstationen gibt, dient sie hier zur Veranschaulichung einiger kybernetischer Prinzipien. Diese Art der Darlegung strittiger Probleme ist sinnvoll, da man dabei auf eine bestimmte Konstruktion und ihr Verhalten zurückgreifen und die Fragen weit klarer und bestimmter formulieren kann.

Die Untersuchung der Fähigkeit elektronischer Rechenmaschinen, Information zu verarbeiten, wird dadurch erschwert, dass am Eingang und Ausgang dieser Maschinen stets der Mensch mit seiner eigenen Fähigkeit zur Informationsverarbeitung steht.

Daher trifft man in der Literatur manchmal Überlegungen an, die folgendes besagen:

In einer Maschine können nur "physikalische Prozesse" vor sich gehen, die "keinen Sinn" haben, der Sinn dieser Prozesse, d. h. die Information, wird durch den Menschen bestimmt; folglich kann Information nur vom Menschen ausgehen.

Unsere "Spinne" bildet zusammen mit ihrem Gehirn ein System, das in bezug auf die Information, die sich nur auf das Verhalten der Spinne bezieht (d. h. ohne die Information, die zur Erde gefunkt bzw. von dort empfangen wird), abgeschlossen ist. Und dennoch liegt eine wirkliche Information vor, sie hat für das System einen Sinn.

Das System muss beispielsweise (zum Zwecke der Selbsterhaltung) alle Handlungen vermeiden, die unter den gegebenen Bedingungen zum Verlust des Gleichgewichts oder zum Kontakt anderer Körperteile als der Beine und Fühler mit beliebigen Gegenständen führen.

Verboten sind nicht bestimmte Bewegungen oder Lagen, sondern bestimmte Beziehungen: In ebenem Gelände führt eine andere Stellung bzw. Bewegungsweise zum Verlust des Gleichgewichts als an einem Abhang. Ein Metallkugelchen, das in einem kleinen Hohlraum zwischen federnden Kontakten hin und her rollt, kann als Rezeptor für die Lage der Spinne dienen, mit dessen Hilfe das "Gehirn" Signale an die Motoren sendet, die die Spinne im Gleichgewicht halten.

Es ist interessant, sich einen kosmischen Kundschafter vorzustellen, der bereits montiert ist, dessen Akkumulatoren aufgeladen sind und der mit dem "Gehirn" in Funkverbindung steht, der aber noch hilflos ist, weil das Gehirn ihm nur regellose Impulskombinationen, d. h. Rauschen, schickt. Da liegt er auf dem Boden und zuckt regellos mit den Beinen, aber mit keiner Stellung

der Beine ist ihm gedient, da Kontakte am Körper melden: Der Körper berührt den Boden. Unter allen möglichen Bewegungen gibt es jedoch solche, bei denen sich der Körper vom Boden löst und die Körperkontakte sich öffnen. Diese Bewegungen werden im "Gehirn" festgehalten, und die Maschine erhebt sich unsicher.

Und nach und nach, Schritt für Schritt, werden die Bewegungen der Beine immer sicherer: Auf vier hat sich die Spinne gestützt, zwei gehoben und bis zum Signal der Hackenkontakte gesenkt, dann das Körpergewicht nach vorn verlagert, ein zurückgebliebenes Beinpaar nachgezogen, dann das andere und das für einen Moment verlorene Gleichgewicht wiederhergestellt usw.

Bei einer hinreichend feinen Regulierung lernt die Maschine schließlich ein wenig zitternd stehen. Ist die Regulierung jedoch grob, so ist die Maschine dazu verdammt, bis zur völligen Erschöpfung der Akkumulatoren regellose Bewegungen auszuführen, die an die bekannte Brownsche Molekularbewegung erinnern, da sie sich noch keine Kriterien für die Zweckmäßigkeit von Bewegungen erarbeitet hat.

Man kann die Spinne lehren, sich nicht weiter vom Nest zu entfernen, als der Energievorrat in den Akkumulatoren zulässt, das Nest zu erkennen und dorthin zum Laden zu gehen, die Kontakte für die "Nahrung" zu suchen, und wenn sie gefunden sind, stehenzubleiben und die Akkumulatoren bis zur Sättigung zu laden. Man kann sie lehren, Hindernisse zu umgehen, nicht in Löcher zu treten, bei denen sich der Hackenkontakt an einem Bein nicht schließt, auf geneigten Flächen und auf Steinhäufen zu klettern, kleine Gegenstände zu ergreifen und zur Analyse ins Nest zu tragen usw.

Dieses Lernen kann man darauf zurückführen, dass man in die steuernde Maschine - in das "Elektronengehirn" - ein Programm einspeist, nach dem sie auf alle "möglichen Fragen und Situationsbeschreibungen, die von den Rezeptoren der Spinne in das "Gehirn" kommen werden, mit Befehlen an den Bewegungsapparat der Spinne antwortet, die in der gegebenen Situation zweckmäßig sind.

Praktisch ist eine solche Unterrichtung undurchführbar, denn sie erfordert Kenntnisse über die Verhältnisse, unter denen die Spinne zu arbeiten hat und außerdem einen nicht überschaubaren Umfang an Programmierarbeit. Daher ist es zweckmäßig, das Gehirn der Spinne durch eine lernende stochastische Maschine zu realisieren. Dieser Maschine werden einige wenige "lebensnotwendige" Programme eingegeben, die z. B. sichern, dass die Spinne sich nicht zu weit von ihrem Nest entfernt, ein Programm für das Aufstehen nach einem Sturz usw. Außerdem werden der Maschine einige Kriterien für ihre Arbeit mitgeteilt.

Dabei erhalten wir ein System, dessen Verhalten nicht genau determiniert ist, sondern bei dem jede Verhaltensweise eine gewisse Wahrscheinlichkeit besitzt, d. h., wir erhalten eine Maschine, die einen "freien Willen" hat.

Um eine determinierte Maschine zu einem System zu machen, dessen Verhalten statistischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt, braucht man seine Konstruktion nicht wesentlich zu ändern: Man muss die Maschine einfach etwas verschlechtern. Betrachten wir als Beispiel den Druckschalter einer gewöhnlichen Lampe.

Der Mensch geht zum Schalter, drückt auf den Knopf, und die Lampe leuchtet auf. Wird der Knopf noch einmal gedrückt, so geht die Lampe wieder aus. So ist der Schalter gebaut, das ist seine Funktionsweise. Sein Verhalten - das Schließen bzw. Öffnen des Kontakts - kann vorausgesagt werden, wenn die vorliegende Situation bekannt ist: Ist der Kontakt geöffnet und der Knopf wird gedrückt (Situation), so schließt sich der Kontakt. An meiner Lampe ist ein

alter Schalter.

Er ist noch nicht so schlecht, dass ich voraussagen könnte: Sooft man den Knopf auch drückt, die Lampe leuchtet nicht auf. Nein, er bringt die Lampe zum Leuchten, und daher wird er nicht weggeworfen. Aber dazu muss man den Knopf manchmal drei- oder viermal drücken, manchmal auch nur einmal; ich kann nur voraussagen, was mit welcher Wahrscheinlichkeit geschieht, wenn der Knopf gedrückt wird.

Dieser Schalter ist schlechter als ein neuer, irgend etwas an ihm ist abgenutzt, und nur die Trägheit hindert mich, ihn auszuwechseln. Aber man beachte: Kein Teil des Schalters wird ausgewechselt, kein Schraublein, kein Kontakt, keine Feder fällt heraus oder kommt hinzu, aber sein Verhalten ändert sich wesentlich. Und diese Eigenschaft kann, wie der Mathematiker Culbertson gezeigt hat, zweckmäßig sein, kann der Erhaltung der Maschine dienen.

Er beschrieb folgende Falle für die elektronische Schildkröte von Grey Walter:<sup>68</sup>

Wir stellen uns vor, dass sich auf dem Weg der Schildkröte zum Licht ein kleiner Anstieg befindet, den sie bewältigen kann. Vor dem eigentlichen Ziel fällt sie durch ein Loch in einen Tunnel, der die Schildkröte unabhängig von ihren Handlungen zum Anfang des Anstiegs bringt. Der hinaufgekrochene und heruntergerutschte Automat befindet sich dann wieder in genau der gleichen Situation wie zu Beginn des Anstiegs.

Das gegebene Programm bleibt das gleiche, die Umweltbedingungen sind die gleichen, es ist klar, dass die gleiche Verhaltensweise folgt: Der Automat klettert, rutscht ab, klettert wieder, rutscht wieder ab usw.

Und nirgends, weder außerhalb noch innerhalb des Automaten, scheint es eine Kraft zu geben, die diese unzweckmäßige sinnlose Bewegung beendet, ehe die Ladung des Akkumulators aufgebraucht ist.

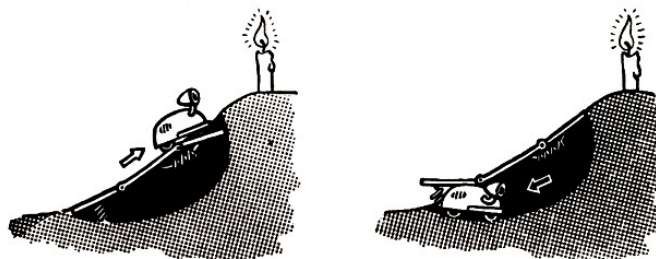


Bild 16.2.: Die Culbertsonsche Falle wurde für nicht genügend "gescheite" Mechanismen erdacht. Der Automat kann nur dann aus ihr herausfinden, wenn es ihm möglich ist, sein Verhalten zu ändern.

Eine streng determinierte Schildkröte besteht die Prüfung von Culbertson nicht. Aber auch eine Fliege, die bis zur völligen Erschöpfung gegen die Scheibe schlägt, obwohl sich zwei Meter weiter ein geöffnetes Fenster befindet, besteht die Prüfung nicht.

Die elektronische Schildkröte hat überhaupt kein Gedächtnis; ihr Programm verkörpert sich ganz in ihrer Konstruktion. Die Fliege hat ein Gedächtnis. In diesem werden Nachrichten der Sinnesorgane, Bewegungsprogramme und einige zweckmäßige Beziehungen zwischen diesen und jenen, die ein Ergebnis ihrer persönlichen Erfahrung sind, aufbewahrt.

Dadurch ist das Gehirnvolumen vollständig ausgefüllt; die Fliege kann sich an den Misserfolg aller stereotypen Programme, die für das Auftreffen auf ein Hindernis vorbereitet sind, nicht erinnern und führt diese Programme daher immer wieder aus.

---

<sup>68</sup>J. T. Culbertson: Some uneconomical robots. Automata Studies. Annals of Mathematics Studies 34, Princeton 1956.

Die Ursache ist hier nicht einmal das vollständige Fehlen eines "freien Willens", d. h. einer Unbestimmtheit im Übergang von den Nachrichten zu den Befehlen, sondern dessen Unzulänglichkeit. Sowohl die Schildkröte als auch die Fliege handeln bei jedem Versuch ein wenig anders, aber die Änderungen reichen nicht aus, um einen Ausweg aus der Falle zu finden.

Bei Versuchen mit kybernetischen Schildkröten entdeckte Grey Walter - zu seinem Erstaunen -, dass sie ihr Verhalten nicht nur etwas variieren können, sondern imstande sind, sich unter denselben Bedingungen vollkommen verschieden zu verhalten.

Unter einem elementaren Automatismus versteht man das Abwickeln eines festen Programms, das sich aus der Konstruktion des gegebenen Systems ergibt. Manchmal genügen elementare Automatismen zur Erhaltung des Systems. Die Bettwanze flieht das Licht, und dieser einfache Automatismus ist sehr gut auf die Gewohnheiten und die Möglichkeiten des Menschen abgestimmt, von dem die Wanze lebt.

Unter gewöhnlichen Bedingungen hat er manchmal verhängnisvolle Folgen. Der Schmetterling fliegt auf Grund eines Automatismus zum Licht, viele Schmetterlinge verbrennen daher in den Flammen offener Feuerstellen. Für die Weltausstellung 1939 wurde ein Modell - eine Nachahmung eines Hundes - vorbereitet, das auf die von den Menschen ausgestrahlte Wärme reagiert. Näherten sich Menschen dem Modell, so fiel es sie an.

Dieses Modell kam um, als es sich am Tag vor der Eröffnung der Ausstellung unter ein Auto warf: Die Wärme, die der Kühler des zufällig vorbeifahrenden Autos ausstrahlte, hatte es unter die Räder gelockt.

Die kybernetische Schildkröte steht insofern etwas über diesen Automaten, als sie ihr Programm zweckmäßig wechselt: Sie geht zum Licht, wenn sie das Bedürfnis nach Nahrung verspürt, und entfernt sich von ihm, wenn eine Übersättigung möglich ist. Ihre Konstruktion enthält außer diesen beiden Programmen noch das Programm, nach dem diese Programme gewechselt werden, wobei die Abwicklung dieses Oberprogramms vom Erfolg oder Misserfolg der vorangegangenen Verhaltensweise und den Veränderungen der Situation abhängt.

In der Schildkröte sind gleichsam zwei Automaten mit den entgegengesetzten Automatismen des Schmetterlings und der Wanze vereint, und jeder Automatismus tritt je nach Bedarf mehr oder weniger in Erscheinung.

Als Grey Walter zwei seiner Schildkröten gebaut hatte, zeigte es sich, dass eine von ihnen mehr Feinheiten im Verhalten zeigte. Wenn die eine Schildkröte ihre Position im Zimmer bereits gefunden hatte und liegenblieb, setzte die andere ihre Bewegung noch fort. Saßen die "satten" Schildkröten in verschiedenen Ecken, so konnte man mit Sicherheit sagen, dass die Ecke, in der die zweite saß, dunkler war, und krochen sie zu den Fenstern, so war es an dem Fenster, an dem die zweite zur Ruhe kam, heller.

Aber der Energievorrat der zweiten wurde schneller aufgebraucht. Als nun das Licht - das Zeichen für die "Fütterung" - aufleuchtete, verhielten sich diese Zwillinge, die ihrer inneren Struktur und ihrem Programm nach nahezu gleich waren, verschieden: Die phlegmatische, noch "satte" Schildkröte verkroch sich tiefer in die Dunkelheit, während die lebhaftere, "hungrige" zum Licht eilte.

Vom Standpunkt einer primitiven Automatik ist diese Erscheinung unbegreiflich. Erinnern wir uns der Überlegungen von James über den des Großhirns beraubten Frosch!

James verglich ihn doch mit einer determinierten Maschine, da er überzeugt war, dass auf einen korrekt gewählten, dem Bau des Nervensystems entsprechenden Reiz eine ganz bestimmte Reaktion eintritt. Er berücksichtigte nicht, dass neben den Umweltreizen und dem Inhalt des

Gedächtnisses auch jene Nachrichten, die von inneren Rezeptoren kommen, das Verhalten mitbestimmen: Das gilt sowohl für den Frosch als auch für eine Maschine, deren Verhalten von ihrem inneren Zustande abhängt.

Die Unterrichtung einer stochastischen Maschine reduziert sich also auf folgendes: Ihrem Gedächtnis, in dem die Übergangswahrscheinlichkeiten (d. h. die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass die Maschine auf bestimmte Situationen mit bestimmten Befehlen bzw. Handlungen reagiert) fixiert werden, wird eine unvollständige Information zugeleitet. Diese Information kann durch die Maschine vervollständigt werden.

Eine der ersten Maschinen, die Information sammelt, führte 1955 Claude Shannon vor, allerdings arbeitet diese Maschine determiniert.

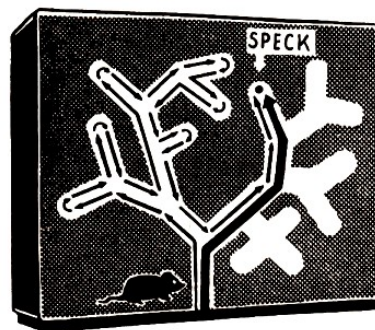


Bild 16.3.: Model der "Shannonschen Maus", die in einem Labyrinth den Weg zum "Speck" sucht. Sie demonstriert die Arbeitsweise jeden Signalsystems, das einen Weg zu einem vorgegebenen Ziel sucht.

In einem nach oben offenen quadratischen Kasten, dessen Boden in 25 Quadrate eingeteilt war, stellte Shannon willkürlich Trennwände auf, und zwar so, dass eine oder zwei Wände an den Seiten eines jeden Quadrats fehlten. In ein Quadrat (den Eingang) legte man eine eiserne "Maus", in ein anderes eisernen "Speck", einfache Klötzchen. Unter dem Boden des Kastens befand sich ein Automat, der die Aufgabe hatte, die "Maus" mit Hilfe eines Magneten zum "Speck" zu bringen.

Das feste Programm, nach dem ein Weg zum Speck gesucht wird, basiert darauf, dass vom Mittelpunkt des Quadrats, in dem sich die Maus befindet, nacheinander vier Probebewegungen gemacht werden: nach links, nach vorn, nach rechts und nach hinten.

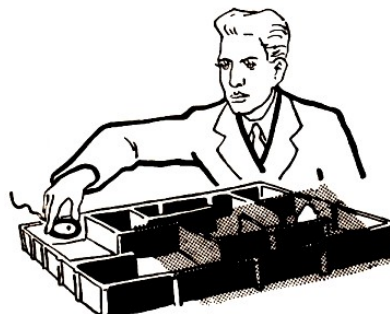


Bild 16.4.: Der hervorragende Mathematiker und Kybernetiker Claude Shannon schuf die Grundlagen der Theorie der Automaten

Trifft die "Maus" auf kein Hindernis, so wird das Signal "Weg frei" gegeben. Auf dieses Signal hin wird erstens die Maus in der zuletzt geprüften Richtung in den Mittelpunkt des nächsten Quadrats bewegt und zweitens diese Bewegung im Gedächtnis des Automaten gespeichert,

ebenso wie sämtliche Prüfergebnisse. Daher "weiß" der Automat auch, Wann die Maus einen ganzen Gang des Labyrinths vergeblich abgesucht hat, usw.

Aus der Labyrinththeorie entnimmt der Konstrukteur die "Einehandregel": Hält man sich in einem Labyrinth beispielsweise immer an der linken Wand, so durchläuft man alle Gänge, die vom Eingang aus erreichbar sind (wenn man nicht vorher den Ausgang benutzt) und kehrt zu diesem zurück.

Dementsprechend gelangt die "Maus" letzten Endes unbedingt zum "Speck", und im Gedächtnis des Automaten ist das Bild ihrer Suche aufgezeichnet.

Bei einem zweiten Versuch verschwendet das Spielzeug keine Zeit auf "blinde" Gänge, sondern bewegt sich auf dem kürzesten Weg zum Speck, wenn man die "Maus" und den "Speck" wieder in dieselben Quadrate legt. Setzt man die "Maus" in ein anderes Quadrat, in dem sie noch nicht war, so wird die Suche so lange fortgesetzt, bis die "Maus" den bekannten Weg erreicht.

Ein in der UdSSR im Institut für Automation und Telemechanik konstruiertes analoges Modell hat die Form einer Tafel mit einem sich bewegenden Lichtpunkt. Es besitzt ein Zeitrelais, das das Gedächtnis nach Ablauf einer bestimmten Frist automatisch löscht.

Ein verhältnismäßig einfaches Programm, das die Wechselwirkung zwischen den Umweltsignalen und den Bewegungen organisiert, ermöglicht es der Shannonschen Maus, im maschinellen Gedächtnis Information zu sammeln und zu speichern. Nimmt man den "Speck" ganz und gar weg, so bricht das Modell die Suche entweder ab, nachdem es das ganze Labyrinth vergeblich durchlaufen hat und dabei zum Eingang zurückgekehrt ist, wenn dies im Programm vorgesehen ist, oder es löscht das Gedächtnis und beginnt die ganze Suche von vorn. Damit gerät es in eine Culbertsonsche Falle.

Man muss folgendes hervorheben: Die Shannonsche Maus benutzt bei ihrer Suche unvollständige Information und vervollständigt diese mit Hilfe eines Zweckmäßigkeitskriteriums, die die von der Maus zu vervollständigende Anfangsinformation darstellt. Während der Suche benutzt die Maus aber auch Information, die sie selbst gesammelt hat - damit erreicht sie z. B., dass sie keinen Gang zweimal durchsucht. Die Kriterien gibt der unterrichtende Mensch vor, und die Aufgabe besteht offenbar darin, den Automaten immer allgemeinere, umfassendere Kriterien vorzugeben und sich dabei möglichst wenig anzustrengen.

Interessante Möglichkeiten eröffnet hier die Vereinigung des Nervensystems des Menschen mit dem Steuerungssystem einer automatischen Maschine zu einem einheitlichen System.

Vom Standpunkt der Theorie bildet der Mensch, der eine Anlage reguliert, natürlich mit ihr ein gemeinsames automatisches System. Aber der Mensch empfindet das, anders:

Er fühlt ständig, dass die Maschine in bezug auf seinen Organismus etwas Fremdes ist. Die Nachrichten über den Zustand der Maschine und die Befehle, die ihr durch Knöpfe und Hebel erteilt werden, werden nicht nur an den Arbeitsergebnissen der Anlage kontrolliert, sondern auch an den Bewegungen der Hände, der Knöpfe und der Zeiger, d. h. an Zwischengliedern.

Die Leistungen der Elektronik haben es ermöglicht, Schaltungen und Einrichtungen zu schaffen, die mit Signalen operieren, welche sich kaum von den Signalen unterscheiden, die im Organismus zirkulieren. Diese Einrichtungen können unmittelbar, ohne Zwischenglieder, und daher für den Menschen nicht wahrnehmbar auf das Nervensystem einwirken und von diesem Signale empfangen.

Im Jahre 1957 riefen die Chirurgen Folkmann und Watkins bei einem Hund eine Störung in der

Herztätigkeit hervor, die zum Tode zu führen drohte. Danach nähten sie in seine Haut einen Impulsgenerator ein, dessen elektrische Signale den Herzmuskel rhythmisch reizten und so die versagende Regelung durch das Nervensystem ersetzen. Der Herzschlag des Hundes wurde wieder regelmäßig.

Ein Jahr später wurde diese Operation an einem Menschen durchgeführt, bei dem hin und wieder gefährliche Unterbrechungen in der Herztätigkeit auftraten. Ein kleines elektronisches Gerät, das unter die Haut genäht wurde, überträgt jedesmal, wenn das Herz stehenbleibt, einen Impuls auf den Herzmuskel, der diesen zur Arbeit anregt.

Jose Delgado, ein Professor der Yale-Universität (USA), "konstruierte" eine über Funk steuerbare Katze. Er führte Elektroden in verschiedene Teile des Gehirns der Katze ein und verband die Zuführungen zu diesen Elektroden mit einem Radioempfänger, der auf entsprechende Funk-signale hin den Elektroden elektrische Impulse zuführte.

Als sich die Katze von der Operation erholt hatte, konnte Professor Delgado ihr Verhalten durch einen Druck auf einen Knopf am Sender steuern. Ein Signal rief ein Jucken der Haut hervor und veranlasste die Katze, sich zu kratzen.

Ein anderes Signal löste bei der Katze ein Durstgefühl aus, und sie ging trinken, obwohl sie zuvor genug getrunken hatte. Ein drittes Signal weckte sie aus dem Schlaf, und sie begann im Käfig hin und her zu laufen. Ein viertes erregte in ihr eine grundlose Wut, das Fell der Katze sträubte sich, sie fauchte und krümmte den Rücken, als ob vor ihr ein Feind stände.

Heute geht die Biostromtechnik von effektvollen Versuchen zur praktischen Hilfe für den Menschen über.

Im Jahre 1957 schufen A. Kobrinski, M. Brejdo, W. Gurfinkel, M. Poljan und andere enthusiastische Moskauer Ingenieure, Elektrotechniker und Ärzte eine künstliche Hand, die durch Bioströme gesteuert wird.

Da die Bioströme unmittelbar zur Steuerung der Muskeln durch das Gehirn dienen, ließ sich diese Hand ebenso unbewusst wie eine natürliche durch das Gehirn steuern. Ihr erstes Modell hatte einen elektromagnetischen Antrieb und ein ziemlich großes System für die Verstärkung und Umformung der elektrischen Signale, die von irgendeinem Muskel abgenommen wurden.

Ein Mensch, der diese Hand hätte benutzen wollen, wäre gezwungen gewesen, sich die ganze Zeit in der Nähe von Steckdosen aufzuhalten und einen großen Röhrenverstärker mit sich herumzutragen. Außerdem nahm die künstliche Hand nur die Signale der Art "Hand schließen - Hand öffnen" wahr, mit welcher Kraft sie das aber tun soll, nahm sie nicht wahr. Hätte jemand versucht, einen Menschen, der eine solche Hand hat, zu begrüßen, so hätte ihn das wahrscheinlich ins Krankenhaus bringen können.

Aber schon mit dem ersten Modell hatte man ein technisches Problem gelöst, mit dem sich nicht einmal die kühnsten Phantasten befasst hatten: Eine gewöhnliche Maschine wurde nur durch den Willen, nur durch den nicht ausgesprochenen Wunsch des Menschen ein- und ausgeschaltet.

Ich habe es gewollt - sie arbeitet, ich habe es gewollt, sie hat aufgehört! Die im Gehirn entstehenden Signale durchlaufen die Nerven, gehen von diesen in die Signalwandler über, die irgendwo nahe der Schulter auf einem Armband angebracht sind, durchlaufen dann Verstärker und Umformer und schalten schließlich künstliche Kräfte ein oder aus und leiten diese Kräfte durch die entsprechenden Kanäle der Maschine. Ein bequemeres Modell einer bioelektrischen Hand arbeitet mit einem kleinen Pressluftbehälter und mit kompakten Verstärkern auf Halbleiterbasis, die in die Hand selbst eingebaut sind.

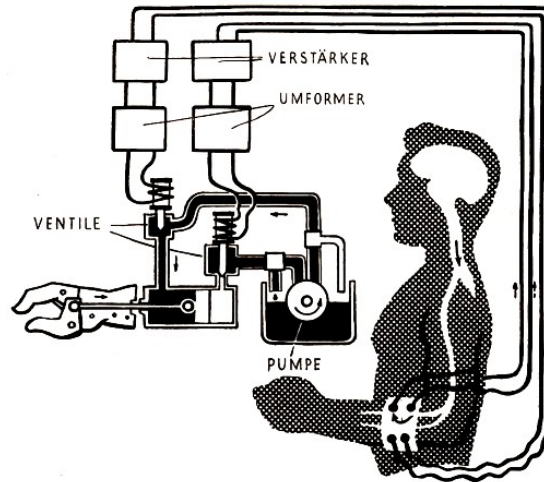


Bild 16.5.: Die bioelektrische Steuerung des hydraulischen Modells der Hand erfolgt mit Hilfe der elektrischen Ströme, die in den Muskeln und Nerven durch vom Gehirn kommende Signale entstehen.

Aber die Ingenieure sind nicht zufrieden. Es gefällt ihnen nicht, dass der Mensch seine künstliche Hand nicht fühlt, dass ihre Unterrichtung im Handeln und die Kontrolle nur über das Sehen als Rückkopplung erfolgen.

Versieht man die künstliche Hand mit Signalwandlern, die die Spannung in den "Sehnen" der Hand und die Temperatur der von der Hand berührten Gegenstände wahrnehmen und in elektrische Signale umwandeln, so erhält das Nervensystem die Rückkopplungssignale direkt von der Hand. Dann kann man mit der künstlichen Hand arbeiten, ohne hinzusehen.

Das gleiche Prinzip kann man auch auf den allgemeinen Fall der Regelung von Maschinen durch den Menschen ausdehnen. Auch dabei verläuft die Rückkopplung größtenteils über die Augen, der Operateur ist gezwungen, die vor ihm angebrachten verschiedenen Messgeräte und Anzeigelämpchen zu beobachten.

Nehmen wir ein Beispiel: Der Pilot eines fliegenden Flugzeugs ist natürlich verpflichtet, die "Benzinuhr", die Anzeige des Brennstoffvorrats in den Tanks, zu kontrollieren, und er tut das auch.

Es ist aber ganz etwas anderes, wenn der Flieger beginnt, den Brennstoffmangel als ein besonderes eigenartiges Hungergefühl zu empfinden: Das ist weit zuverlässiger, überzeugender, leichter. Wie viele Geräte befinden sich heute auf dem Instrumentenbord vor dem Flieger!

Alle dienen sie zur Rückmeldung, alle helfen dem Flieger, die Maschine, ihren Zustand und die Art, wie sie seine Befehle ausführt, zu "fühlen". Und warum soll man nicht die Anführungsstriche bei dem Wort "fühlen" beseitigen, warum soll man nicht dem Operateur wirklich die Möglichkeit geben, den Zustand der Maschine zu fühlen?

Heute interessiert man sich besonders für Möglichkeiten, das Sehvermögen bei hoffnungslos blinden Menschen, bei denen nicht nur die Augen zerstört, sondern auch die Sehnerven abgestorben sind, wiederherzustellen. Mit Hilfe elektronischer Geräte ist es prinzipiell möglich, in das Sehzentrum des Gehirns nicht nur die von einem Fotoelement übermittelten Signale zu schicken, sondern ganze Kombinationen davon - Nachrichten über Bilder, die man mit Hilfe einer Optik auf einem lichtempfindlichen Schirm in einer Kamera erhält.

Es gibt dafür verschiedene Methoden, die gegenwärtig untersucht werden. Erstens kann man von jedem Element eines lichtempfindlichen Mosaiks ein Signal in eine einzelne Faser des Sehnervs leiten. Aber eine entsprechende Operation liegt vorläufig nicht im Bereich des chirurgisch



Möglichen.

Zweitens kann man das Bild in Zeilen und Punkte zerlegen, wie das im Ikonoskop geschieht, und durch ein oder zwei Kanäle übertragen. Wir können aber nicht sicher sein, dass das Gehirn, dem die Bildzerlegung des Fernsehens fremd ist, dieses Signal als Bild erkennt.

Der Verfasser dieses Buches schlug eine Methode zur Bildzerlegung vor, die sich auf die Benutzung von Biostromsignalen gründet, die das Gehirn selbst erzeugt, und zwar zur Bewegung des Augapfels. (Um einem komplizierten chirurgischen Eingriff am Kopf aus dem Wege zu gehen, kann man auch Signale benutzen, die über irgendeine Nervenbahn in die Nähe der Haut gelangen. Dann muss man die Signale nach Form und Rhythmus transformieren.)

Legt man diese Signale an das Ablenssystem eines Ikonoskops an, so können sie den Elektronenstrahl veranlassen, das Bild in einer beliebigen Art und Weise abzutasten.

Von großem Interesse für die industrielle Automatisierung ist die Aufgabe, einem suchenden Automaten auf bioelektrischem Wege binäre Signale zu übermitteln, die ihm bei der Suche helfen. Um eine klarere Vorstellung von dieser Aufgabe zu erhalten, erinnern wir an die aufsehererregenden "psychologischen Versuche", die der Künstler Wolf Messing seit vielen Jahren vorführt.

... In feierlicher Haltung tritt der Künstler auf die Bühne. Er bittet irgendeinen Zuschauer, der Lust hat, auf die Bühne zu kommen und sich irgendeine Aufgabe auszudenken, die er erraten und ausführen wird, indem er angeblich "die Gedanken liest". Natürlich tritt bei einem Zuschauer auch der Wunsch auf, dass der Künstler ein von ihm gedachtes Wort errät. Aber der Künstler lehnt es ab zu sprechen und zu singen, er kann nur handeln.

Ist die Handlung ausgedacht und neutralen Personen zur Kontrolle mitgeteilt, so bittet der Künstler den Zuschauer, ihn an der Hand zu fassen. Der Künstler hat in seinem Gedächtnis eine große Menge von Aufgaben, die die Menschen gewöhnlich in einer solchen Umgebung stellen. Es sind übrigens nicht so viele, wie man annehmen könnte; die Phantasie der Zuschauer bewegt sich im allgemeinen in engen Grenzen: irgend etwas ist zu finden, an einen anderen Platz zu stellen usw.

Im weiteren geht der Künstler so vor, wie es die Kybernetik vorschreibt:

Er zerlegt die Menge der Aufgaben in zwei gleichmögliche Teilmengen und stellt die erste dichotomische Frage, er trifft eine erste Auswahl, z.B.: "Muss die Handlung auf der Bühne oder im Saal ausgeführt werden?"

Diese Frage wird folgendermaßen gestellt:

Der Künstler macht eine Bewegung, die seine Absicht zeigt, in den Saal zu gehen. Der Zuschauer beurteilt diese Bewegung unwillkürlich. Ohne es zu wollen und unmerklich für sich selbst macht er eine warnende oder ermutigende Bewegung mit der Hand, mit der er die Hand des Künstlers hält. Nachdem der Künstler so die erste Antwort erhalten hat, stellt er die zweite Frage: "nach rechts oder nach links?" und setzt die Suche fort, wobei er jedesmal die Anzahl der möglichen Aufgaben halbiert.

Diese ganze Operation kann man einer Maschine übertragen, die direkt mit dem Nervensystem des Menschen verbunden ist. Man kann sich zum Beispiel ein Auto vorstellen, das einen Passagier ohne Angabe einer Adresse in die gewünschte Straße und zu dem gewünschten Haus bringt. Jedesmal, wenn die Möglichkeit, zwischen zwei oder mehr Straßen zu wählen, auftaucht (und in Großstädten schränken die Verkehrsregeln diese Möglichkeiten stark ein), beginnt die Maschine die wahrscheinlichere Fortsetzung zu wählen. und der Mensch wird, ohne sich selbst

dessen zu verdächtigen, "ja" oder "nein" befehlen.

Einer solchen Regelung durch Bioströme wird man mit der Zeit alle Maschinen unterwerfen können, die dem Menschen dienen. Die Steuerung wird wahrscheinlich über Funk erfolgen.

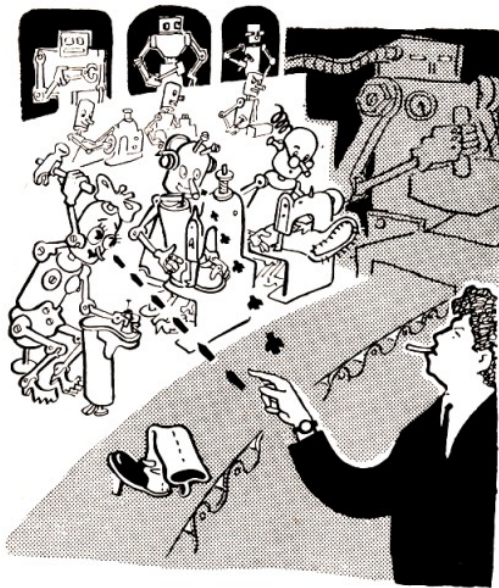


Bild 16.6.: Ein winziger durch Bioströme gesteuerter Sender ermöglicht es den Maschinen, die unwillkürliche Reaktion des Menschen auf ihr Verhalten zu erraten und dieses Verhalten entsprechend den Wünschen des Menschen zu ändern.

Das Gefühl der Macht des menschlichen Willens über eine Maschine bei der Arbeit mit bioelektrischen Steuersystemen ist eigenartig: Zuerst gelingt es nicht, die Maschine zu steuern, dann wird sie zu mehr oder weniger regellosen Bewegungen angeregt, und schließlich gehorcht sie dem Menschen völlig.

Aber in Worten auszudrücken, ändern zu erklären, wie das gemacht wird, wie man auf die Maschine einwirken muss, das ist fast unmöglich. Diese Fertigkeit erlangt man ebenso unbewusst, wie die Kinder das Laufen erlernen. Wie jede andere Fertigkeit kann aber auch diese nur mittels einer Rückkopplung erlernt werden - wenn man nicht verfolgt, was sich bei den Versuchen ergibt, so lernt man nichts.

Man kann sich eine Abteilung einer Fabrik der Zukunft als lange Reihe von Maschinen vorstellen, die alle mit Anzeigelampen versehen sind. Jeder Willensimpuls, den ein winziger Sender am rechten Arm angebracht ist, über einen Funkkanal überträgt, ruft einen Sprung hervor: Lampen leuchten der Reihe nach auf, und in der Steuerleitung werden nacheinander alle Aggregate umgeschaltet.

Auf diese Weise kann man den Maschinen ferner übermitteln, ob man mit ihrer Produktion zufrieden ist oder nicht usw. Die Maschinen ändern dann ihr Verhalten entsprechend.

"Wozu ist das alles nötig, wenn eine kybernetische Anlage jede Abteilung und die ganze Fabrik steuern wird?" kann der Leser fragen. Aus folgendem Grunde:

Wenn wir auch bestrebt sind, den Menschen im Gebiet der Produktion durch eine Maschine zu ersetzen - und das ist der Sinn der Automatisierung - so bleibt er doch im Gebiet des Konsums der Hauptfaktor. Das, was die Maschinen tun, kann ihm gefallen oder nicht gefallen, und hier kann man keine objektiven Kriterien aufstellen, die eine Programmierung zulassen.

Es kann geschehen, dass die besten Muster der Produktion dem Menschen als Kunden einfach deshalb nicht gefallen, weil sie ihn langweilen oder aus der Mode gekommen sind, weil jeder

Mensch den Wunsch hat, originell zu sein, sich von anderen zu unterscheiden und das von seiner Kleidung, den Möbeln, der Personenbeförderung und der Wohnung verlangt.

Offenbar ist eine solche "bioelektrische Korrektur" die vollkommenste Art der Einführung eines "subjektiven Faktors" in die Arbeit der Steuerungsmaschinen, die auf der Grundlage objektiver Gesetzmäßigkeiten gebaut sind.

Das gleiche Prinzip kann man bei der Schaffung einer Maschine zur Aufzeichnung von Gedanken verwenden. Ihre Konstruktion ist ganz einfach: eine Glastafel mit Buchstaben, die ein Lichtstrahl nacheinander abtastet, und ein Biosignalisator, der ein Druckgerät einschaltet, wenn der gedachte Buchstabe mit dem im Moment beleuchteten übereinstimmt.

Bei einem gewissen Training erfordert die Arbeit mit einer solchen Maschine vermutlich keine Anstrengungen: Die Niederschrift folgt den Gedanken fast unbewusst.

Die bioelektrische Steuerung löst jedoch das Problem der vollständigen Automatisierung nicht: Das Gehirn des Menschen bleibt immer noch das Zentrum, das die Information der Maschine verarbeitet. Automatisch im echten Sinne des Wortes ist eine Anlage erst dann, wenn sie ein Signalsystem enthält, das die jeweilige Situation selbst einschätzt und darauf seinen Zweckmäßigkeitskriterien entsprechende Befehle ausarbeitet und ausführen lässt.

Es besteht dabei im allgemeinen keinerlei praktische Notwendigkeit, die Maschine selbständig auf Kosten äußerer Potentiale Information sammeln zu lassen.

Die Aufwendungen für Versuche im Lernprozess sind unnütz, wenn deren Resultate im voraus bekannt sind und dem Automaten unmittelbar mitgeteilt werden können.

Der Mensch ist nicht daran interessiert, der ganzen ihn umgebenden Technik den Status eines wilden Tieres, das ausschließlich mit der Befriedigung der eigenen Bedürfnisse und der eigenen Neugier beschäftigt ist, zu verleihen. Der Mensch möchte dem Automaten in einer für ihn bequemen Form Superprogramme geben, und das Signalsystem des Automaten soll diese zu konkreten zweckmäßigen Programmen entwickeln.

Er will zum Beispiel einer Drehmaschine oder Fräse die Maße, die Form und die Toleranzen eines gewünschten Erzeugnisses angeben und es ihr überlassen, die Reihenfolge und die Dauer der Arbeitsgänge zu klären. Der Mensch ist bereit, der Maschine mit seiner Erfahrung zu helfen, indem er ihr ein für allemal mitteilt, wie das gemacht wird, indem er ein Programm von Umformungen angibt.

Dazu genügt es, eine gewöhnliche universelle Werkbank - eine programmgesteuerte Werkzeugmaschine - mit einem so universellen und schnell arbeitenden Signalsystem wie einer elektronischen Rechenmaschine zu verbinden. Der Rechenautomat erhält ein Programm von logischen und arithmetischen Operationen, nach dem er aus den Parametern des gewünschten Produkts das ökonomischste Arbeitsprogramm der Werkbank berechnet.

Beim Übergang von einem Typ des Produkts zu einem anderen ändern sich nur die Parameter, das Programm des Rechenautomaten braucht also nicht geändert zu werden, obwohl sich sein Resultat - das Programm der Werkbank - bei diesem Übergang ganz erheblich ändern kann. Wird das Produkt in Serien hergestellt, dann wird das Programm in einen mit der Werkbank verbundenen Speicher übergeben, und der Rechenautomat ist frei für andere Arbeiten, er kann z. B. das Programm für eine andere Werkbank zusammenstellen.

Manchmal ist es vorteilhaft, als "Elektronengehirn" eine Analogiemaschine zu verwenden. So wurde die automatische Steuerung eines elektrischen Vorortzuges zum ersten Mal im Sommer 1958 in der UdSSR durch die Analogiemaschine "Automaschinist" verwirklicht, die unter der

Leitung von A. Nikolajew gebaut worden ist.

Für die industrielle Anwendung sind universelle Digitalrechner, die die Automatisierung beliebiger Rechnungen ermöglichen, geeigneter. In der Sowjetunion existieren schon eine Reihe von Werkbänken, die von Rechenmaschinen programmiert werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Arbeitsgeschwindigkeiten von Werkbänken, die mit Hilfe solcher Maschinen gesteuert werden, auf das Zwanzigfache erhöht und die Selbstkosten der Produktion dabei auf die Hälfte gesenkt werden können.

Die konsequente Verfolgung dieses Prinzips muss zu tiefen Veränderungen in der Struktur der automatischen Werkbänke selbst führen. Es ist stets bequemer, ein neues Programm auszuarbeiten als in der Werkbank komplizierte Einrichtungen zur Übertragung und Umformung von Bewegungen auszutauschen. Die Programmsteuerung ermöglicht es, zu universellen Konstruktionen zurückzukehren.

Bisher wurde die Automatisierung vieler Gebiete der Industrie dadurch gehemmt, dass Automaten für eine Produktion in kleinen Serien unvorteilhaft sind. Bei einem häufigen Wechsel des Typs der erzeugten Werkstücke verschlingt der Aufwand an Zeit und Arbeitskraft für den Umbau der Automaten die ganze Einsparung der Automatisierung.

Die Automaten selbst werden sehr kompliziert und unzuverlässig in der Arbeit und unterliegen schnell dem sogenannten "moralischen Verschleiß", und zwar je eher, je spezialisierter der Automat ist.

Je höher die Spezialisierung und Automatisierung eines Aggregats, einer automatischen Abteilung oder einer automatischen Fabrik ist, desto größer ist die Gefahr, dass sie eines schönen Tages nutzlos ist, weil ihre Produktion nicht mehr gefragt ist und ihr Umbau auf die vervollkommnete Produktion so kompliziert ist, dass es ökonomischer ist, ein neues Aggregat, eine neue Abteilung, ein neues Werk zu bauen.

Alle diese Unannehmlichkeiten werden mit der Einführung der Programmsteuerung und erst recht mit der Herstellung der Programme durch elektronische Rechenmaschinen beseitigt.

Von dem Zeitpunkt an, an dem die elektronische Rechenmaschine eng mit dem Signalsystem des arbeitenden Automaten verbunden ist und die Herstellung kompakter, billiger Rechenautomaten möglich ist, hört der vollständige Automat auf, nur ein unterhaltsames Demonstrationsgerät zu sein, das die Meinung von Skeptikern über die Fähigkeiten von Maschinen widerlegt. Der vollständige Automat wird zu einer Kraft, die die ganze Produktion - die materielle Grundlage der menschlichen Existenz - verändert.

In verschiedenen Produktionszweigen hat man Dutzende von sehr vorteilhaften Technologien ausgearbeitet, die bis heute nicht verwendet werden, weil ihre Realisierung mit großen Gefahren für die Gesundheit der Arbeiter verbunden ist. Wir können z.B. die Wirkungen starker radioaktiver Strahlungen in der Industrie nicht ausnutzen und beschränken die Anwendung von Arsen, Quecksilber, Chlor und anderen aktiven chemischen Stoffen, von hohen und tiefen Temperaturen, von hohen und niedrigen Drücken.

Die Romanschriftsteller beschreiben die Fabriken der Zukunft gewöhnlich als geräumige helle blumengeschmückte Säle, in denen Menschen als Beobachter zwischen Reihen von Automaten geruhsam einherwandeln. Nichts dergleichen! Sobald die Möglichkeit besteht, den Menschen von dem Ort zu entfernen, wo die Produktion stattfindet, werden die Ingenieure dort wahrhaft höllische Bedingungen schaffen, die zu einer wesentlichen Erhöhung der Produktivität führen, aber für jedes lebende Wesen unerträglich sind.

"Zwischen Blumen spazieren gehen kann man im Park", werden die Ingenieure sagen, "hier ist

die Produktion!" Um der wachsenden Erdbevölkerung nicht unnötig Platz auf der Erdoberfläche zu rauben, werden die automatischen Werke, die die Anwesenheit von Menschen nicht erfordern, nach unten in die Gesteinsschicht der Erde, in die Tiefe des Meeres oder in Gebiete verlegt, die für den Menschen klimatisch ungünstig sind.



Bild 16.7.: Wenn es die Automatisierung möglich macht, dass sich die Menschen überhaupt nicht mehr in den Fabriken aufhalten müssen, so können die Ingenieure diejenigen technologischen Mittel, die heute aus Sicherheitsgründen verboten sind, ungehindert einsetzen.

Kein kompliziertes automatisches System ist gegen Schäden gefeit, und für den Notdienst unter gefährlichen Bedingungen wird man "Roboter" schaffen. Dieses Wort stammt von dem bekannten tschechischen Schriftsteller Karel Capek. Er bezeichnete damit phantastische Menschen aus künstlich geschaffenen lebenden Geweben; gewöhnlich versteht man aber Maschinen darunter, die dem Menschen äußerlich ähnlich sehen.

Bisher hat man menschenähnliche Roboter in der Hauptsache zur Demonstration technischer Möglichkeiten gebaut. Ein Roboter ist von Schülern auf der Moskauer U-Bahn-Station "Tschkalowskaja" aufgestellt worden. Er führt einige Befehle aus, die ihm über Funk erteilt werden.

In der letzten Zeit werden menschenähnliche Mechanismen praktisch verwendet. In den USA hat die Firma "Alderton" schon eine ganze Serie von Robotern herausgebracht; sie erproben Versuchsmuster von Autos, Flugzeugen und Raketen. Diese Maschinen sind Modellpuppen von Friseuren oder Schneidern sehr ähnlich, nur die Röhre des "Fernsehages", die mitten aus der Stirn ragt, verleiht ihnen ein seltsames, ziemlich unangenehmes Aussehen.

Die Reklame- und Liebhaberroboter mit ihren maschinenartigen Formen erscheinen wesentlich ästhetischer als diese sich bewegenden rosa Puppen in Jacken und Hosen.

Soll eine Maschine, nachdem man sie erprobt hat und beherrscht, von einem Menschen gesteuert werden, so ist es tatsächlich zweckmäßig, den Menschen bei lebensgefährlichen Erprobungen durch eine Puppe zu ersetzen, die ihm in Größe, Form und Gewicht genau entspricht. Es ist außerdem wünschenswert, dass diese Puppe die Maschine durch Hand- und Fußbewegungen steuert. Das lässt sich alles leicht und ohne Gefährdung von Menschen mittels programmierter oder funkgesteuerter Roboter durchführen.

Unter anderen Bedingungen sollte man eine äußere Ähnlichkeit einer Maschine mit dem Menschen nicht anstreben, da die Proportionen des menschlichen Körpers und dessen äußerer

Aufbau den Eigenschaften des lebenden Gewebes entsprechen. Die Signalwandler, die ausführenden Organe, das Signalsystem und die Energiespeicher, die für das Funktionieren eines jeden Automaten notwendig sind, beruhen auf anderen physikalischen Grundlagen, und diese Andersartigkeit der Automaten verlangt einen anderen Bauplan und andere Proportionen der Teile.

Daher werden die Roboter, die sich in der gefährlichen Arbeitszone einer Fabrik bewegen, den Menschen äußerlich kaum ähnlich sein.

Man kann sie mit den weißen Blutkörperchen vergleichen, die ständig aufpassen und bereit sind, den Hauptaggregaten im Falle eines Schadens oder der Gefahr eines Schadens zu helfen.

Dieser Vergleich scheint noch begründeter, wenn man berücksichtigt, dass die Menschen ihre Tätigkeit koordinieren, indem sie Information austauschen, indem sie die Information in den historisch entstandenen, relativ unökonomischen und ungenauen Kodes (Sprache, Schrift und Zeichnung) ausdrücken.

Die Funktechnik ermöglicht es, alle Informationen, die in den Signalsystemen der Roboter niedergelegt sind, zusammenzufassen und das Verhalten der Roboter auf einen allgemeinen Plan abzustimmen, der etwa von einer Hauptsignalmaschine des Betriebs nach dem Willen und unter der Kontrolle des Menschen ausgearbeitet wird. Die Roboter sind also frei bewegliche Organe eines Produktionssystems, seine allgegenwärtigen Augen, Ohren und Hände, und das Hauptsignalsystem hat die Pflicht, für ihre Ernährung, Neubildung und Reparatur zu sorgen.

Wissenschaftler und Ingenieure, die Probleme der Automatisierung untersuchen, beschäftigen sich schon seit langem mit der Konstruktion solcher Maschinen. Man erprobt zum Beispiel funkgesteuerte Planierdrahten zur Arbeit an Orten, die durch radioaktive Stoffe verseucht sind, funkgesteuerte Raketen und andere Konstruktionen. Die Praxis bestimmt in jedem einzelnen Falle, wieviel Selbständigkeit man den Automaten lassen und welche Aufgaben man den Koordinierungszentren übertragen muss.

Zum Abschluss muss man unterstreichen, dass die Automaten, die unter der Kontrolle des Menschen entwickelt werden und seinen Bedürfnissen dienen, praktisch niemals einen so hohen Automatismus besitzen werden wie der Mensch. Man kann sich ihre vollständige Unabhängigkeit vom Menschen auch kaum als zweckmäßig für uns vorstellen, wenn sie nicht gerade selbständig fern von den Informationsströmen der Menschheit arbeiten sollen, etwa auf noch unerforschten Planeten.

Wir haben uns bereits davon überzeugt, dass unsere "Spinne", dieses eigenartige für dieses Ziel geeignete Gebilde, sich nicht durch jene ungeheure Kompliziertheit auszeichnet, mit der phantasievolle Romanschriftsteller ihre "denkenden Roboter" ausstatten. Ihr Körper ist ziemlich einfach gebaut, ihr "Gehirn" ist einfach eine universelle elektronische Rechenmaschine mit einem Programm, das diese Maschine zum Lernen aus eigener Erfahrung befähigt, oder, falls das technisch bequemer ist, ein lernendes stochastisches System.

Wenn wir von einer stochastischen Matrix, von Elementen mit veränderlichem Schwellenwert und ähnlichen Dingen sprechen, so verfolgen wir nicht das Ziel, einzelne konkrete Konstruktionen darzustellen, sondern streben nur danach, ihre Prinzipien anschaulich darzulegen.

Zu ihrer Modellierung kann man immer eine gewöhnliche digitale Rechanlage benutzen, in der die Eigenschaften "besonderer" stochastischer Neuronen durch zufällige Zahlen dargestellt werden. Daher hat die Art und Weise, in der das Gehirn der "Spinne" technisch realisiert ist, so seltsam das klingt, keinen Einfluss auf deren Verhalten:

Ob in diesem Gehirn Magnettrommeln, Transistoren oder Solionen verwendet werden, findet

nur im Wert, in der Masse und in der Arbeitsgeschwindigkeit des Gehirns seinen Ausdruck.

Das wesentlichste Hindernis bei der Verwirklichung von "fastdenkenden" Maschinen ist die Notwendigkeit, den Informationsfluss zu beschränken. Das Gehirn der "Spinne" muss, damit die Spinne sich zweckmäßig verhalten kann, in seinem Innern ein Modell der Umwelt aufbauen, das seinem eigenen Aufbau und seiner Umwelt, in der es arbeiten wird, gleichermaßen angepasst ist.

Die Rezeptoren der "Spinne" müssen möglichst ökonomisch arbeiten, d. h., sie dürfen nur wesentliche (neue) Informationen über die Umwelt durchlassen, damit das Gehirn nur diese Nachrichten mit dem Modell vergleichen muss, um es zu korrigieren. Nur unter diesen Bedingungen kann das Gehirn die in ihm aufbewahrte Information "verdichten", d. h. ihren Gehalt erhöhen und gleichzeitig im Rahmen des praktisch Realisierbaren bleiben.

In diesem Prozess vereinen sich Voraussage und Erkennen, die am wenigsten erforschten Teilgebiete der Kybernetik.

Im Verhalten von Lebewesen bezeichnet man die zielgerichtete Aufnahme von Informationen als Aufmerksamkeit. Diese Erscheinung kommt im Gehirn vermutlich dadurch zustande, dass die Informationen über den Prozess, auf den sich die Aufmerksamkeit richtet, vorrangig verarbeitet und gespeichert werden.

Dabei vergrößern sich die Felder im Gehirn, die diese Informationsverarbeitung vornehmen, auf Kosten anderer Zonen. Daher wird jede Aufmerksamkeit auf einen gegebenen Prozess von einer Zerstreutheit in Bezug auf die anderen begleitet.

Im Grunde sind die aufmerksamsten Menschen die "zerstreuten Gelehrten", die die Fähigkeit entwickeln, ihre Aufmerksamkeit so auf das Durchdenken der sie interessierenden Probleme zu konzentrieren, dass sie gegenüber ihrer Umwelt vollkommen gleichgültig werden.

Ist unsere Aufmerksamkeit z. B. auf eine Vorlesung gerichtet, so gelingt es uns, das Wort des Dozenten zu Ende zu sprechen, kaum dass er es begonnen hat, und gleichzeitig bemerken wir die Unbequemlichkeit der zufällig eingenommenen Haltung nicht. Umgekehrt gelingt es einem unaufmerksamen Hörer, sowohl die Spatzen am Fenster als auch die reizende Nachbarin und andere Dinge zu bemerken, aber er bleibt ahnungslos, was den Inhalt der Vorlesung angeht.

Die Konstruktion von Automaten mit Voraussicht und Aufmerksamkeit ist eine dringende Aufgabe der modernen Technik, besonders der Nachrichtentechnik, in der die Redundanz der übertragenen Information zu einem unproduktiven Verbrauch von Energie, Zeit und wertvollen elektrotechnischen Materialien zwingt.

Bei der Beschäftigung mit den Problemen des Erkennens und der Voraussage erzielten viele sowjetische Kybernetiker, insbesondere M. Bongard und L. Kraismet, wertvolle Ergebnisse. Ihre Modelle sind allerdings noch zu redundant, zu groß im Volumen und können in der industriellen Automation praktisch nicht genutzt werden.

Aufmerksamkeit besteht im wesentlichen darin, redundante Informationen auszusondern. Wenn Sie zu telefonieren beabsichtigen, so wählen Sie aus den in ihrem Notizbuch stehenden - vielleicht 100 - Telefonnummern eine aus, und die Information über diese Auswahl kann durch zwei Ziffern im dezimalen Zahlensystem ausgedrückt werden.

Die Telefonnummer hat jedoch sechs oder mehr Grundziffern, sie kann eine Information über eine Auswahl aus einer Million anderer Nummern enthalten. Niemand wählt jemals wirklich unter Millionen Telefonnummern; Sie wissen nicht einmal, wem die übrigen Nummern gehören.

Während der Arbeit setzen Sie sich meist mit Mitarbeitern Ihres Betriebes in Verbindung, und

dafür gibt es dort ein spezielles internes Netz, bei dem es genügt, zwei oder drei Ziffern im Dezimalsystem zu wählen: Sie wählen also aus einer geringeren Anzahl aus. Der Einsatz solcher Nebenanschlüsse führt zu einer großen Einsparung und ist weit verbreitet. Er berücksichtigt aber die individuellen Interessen eines beliebigen Fernsprechteilnehmers nicht, die Schaltautomaten sind (durch ihre Struktur) fest programmiert.

Gegenwärtig arbeiten viele wissenschaftliche Institutionen an der Entwicklung von anpassungs- und lernfähigen Schaltautomaten. Wenn Sie den Hörer eines solchen Telefons abnehmen, so ist es auf Grund der gesammelten Erfahrung bereit, Sie mit dem zu verbinden, mit dem Sie am häufigsten gesprochen haben. Am ersten Signal erkennt es, ob seine Voraussage richtig war oder nicht; wenn nicht, so erweitert es den Kreis seiner Aufmerksamkeit auf das erste Hundert oder Tausend Ihrer Bekannten oder Kollegen, die es schon kennt; erst der vierte Befehl, der es in einen Bereich von Verbindungen führt, die ihm aus früherer Erfahrung nicht bekannt sind, lähmt seine Zuvorkommenheit: Nun ist ihm alles gleich.

Aber die Redundanz der Zifferninformation ist etwa im Vergleich zu der der visuellen gering. Bei der Fernsehübertragung wiederholt das folgende Bild vielfach das vorangegangene. Baut man neben der gewöhnlichen Bildröhre in den Fernsehempfänger eine Gedächtnisröhre ein, so brauchte man ein unbewegliches Bild, beispielsweise eine Unterschrift, nur einmal vollständig zu übertragen und könnte sich dann auf das weit einfachere Signal "wiederholen, wiederholen ..." beschränken. Bei jedem solchen Befehl würde alles, was auf dem Schirm der Gedächtnisröhre geschrieben ist, auf den Schirm der Bildröhre übertragen werden, und kein Fernsehzuschauer würde das bemerken.

Bei beweglichen Bildern könnte man durch besondere Signale nur das übertragen, was das gegebene Bild von dem vorangegangenen unterscheidet, alles übrige würde der Fernsehautomat selbst ergänzen. Die Benutzung von gehaltvolleren Codes ermöglicht es den Nachrichtenfachleuten, mehr Nachrichten durch denselben Kanal zu übertragen, z. B. die Farbe und die dritte Dimension, oder die Reichweite durch Übergang zu längeren Wellen zu erhöhen usw.

Auf die Arbeit eines Rundfunkempfängers, der nach dem gleichen Prinzip gebaut ist, werden sich atmosphärische Entladungen, Abnutzungen von Kontakten und andere Störungen ungewöhnlich auswirken: Sie werden vielleicht kein Prasseln und Rauschen hervorrufen, aber der Empfänger wird die Worte verzerren, wird sie falsch gebrauchen und beginnen, nicht richtig gebildete, ja sogar falsche oder unangebrachte Aussagen von sich zu geben!

Ein vollkommenes Programm zur maschinellen Abstraktion hat der sowjetische Mathematiker E. Brawerman ausgearbeitet.

Bei unserer geometrischen Darstellung des Verhaltens durch das Verhaltensfeld haben wir bewusst eine ernste Schwierigkeit außer acht gelassen. Sie besteht darin, dass ein Signal, das durch ein Kodewort beschrieben, dann als Dualzahl bzw. als Punkt auf einer Koordinatenachse gedeutet wird, auf dieser Achse eine zufällige Lage einnimmt, die von den Störungen abhängt. Wir wissen, dass die einzelnen Stellen in Dualzahlen nicht den gleichen Wert besitzen: Ein Fehler in der niedrigsten Stelle ändert die Zahl und damit auch ihre Lage auf der Achse wenig, während sich ein Fehler in der höchsten Stelle entscheidend auswirkt.

Bei der Kodierung von Nachrichten und Befehlen wird die Information aber gewöhnlich gleichmäßig über das ganze Kodewort (bzw. über alle Stellen des als Dualzahl aufgefassten Kodeworts) verteilt.

Um diese Schwierigkeit zu überwinden, schlug E. Brawerman vor, den Kodewörtern nicht Punkte auf einer Achse, sondern Punkte eines mehrdimensionalen, beispielsweise eines sech-



zigdimensionalen Raums zuzuordnen.

Einen mit dem Begriff des mehrdimensionalen Raumes nicht vertrauten Menschen kann das in Verlegenheit bringen, da man sich schon einen vierdimensionalen Raum nicht anschaulich vorstellen kann. Um so weniger ist es möglich, sich einen sechzigdimensionalen oder unendlichdimensionalen Raum vorzustellen. Diese Verallgemeinerungen des gewöhnlichen geometrischen Raumbegriffs werden in der Mathematik untersucht.

Alle möglichen Kodewörter bilden in diesem Raum die Ecken eines Hyperwürfels. Jede Störung, die ein Kodewort zufällig in ein anderes überführt, versetzt den entsprechenden Punkt aus einer Ecke des Hyperwürfels in eine andere. Diese Ecken sind benachbart, wenn nur ein Zeichen im Kodewort durch die Störung geändert wird.

Allgemein bleibt der Abstand zwischen den erwähnten Ecken bei kleinen Störungen gering. Im "eindimensionalen Raum", d. h. auf der Zahlengeraden, kann dagegen ein Fehler den Punkt sehr weit von der ihm eigentlich zukommenden Stelle entfernen.

Dann beschloss E. Brawerman, die Redundanz auszunutzen, die, wie wir bereits wissen, die Nachrichten und Befehle gegen Störungen sichert, das heißt die Tatsache, dass kein zufälliger Fehler den Sinn einer redundant kodierten Nachricht wesentlich ändern kann.

In dem mehrdimensionalen geometrischen Modell drückt sich die Tatsache dadurch aus, dass alle Ecken des Hyperwürfels, in den ein Punkt durch Störungen gestoßen werden kann, ein kompaktes Gebiet des Hyperraums bilden, das man durch geeignete Hyperebenen begrenzen kann. Betrachten wir beispielsweise die Zeichnungen des Buchstaben A als Varianten, die durch Störungen verderben sind, so gehören die den Kodewörtern aller dieser Zeichnungen entsprechenden Punkte zu einem Gebiet, das von den anderen Buchstaben zugeordneten Bereichen durch ein Gebiet verbotener - d. h., praktisch niemals auftretender - Kodewörter (bzw. Punkte) getrennt ist.

Diese Annahme bezeichnete man als "Ganzheitshypothese".

Zur Trennung der kompakten Gebiete wurde ein Verfahren vorgeschlagen, das wir im folgenden kurz beschreiben. Nachdem die Maschine eine Nachricht darüber erhalten hat, was ein bestimmtes Kodewort "bedeutet", teilt sie ihren Hyperraum in zwei Teile, und das Gebiet, in dem sich der Punkt - sagen wir „A“ - befindet, "nennt" sie „A“ und das andere „nicht A“. Jeden anderen Punkt, der in das Gebiet „A“ fällt, liest die Maschine so lange als Variante dieses Buchstaben, bis ein Signal einen Fehler anzeigt. Hat die Maschine ein solches Signal erhalten, so zieht sie eine neue Trennhyperebene und benennt die entsprechenden Gebiete. Wie der Mensch geht die Maschine von sehr weitgehenden und ungenauen Verallgemeinerungen zu beschränkteren und zuverlässigeren über.

Nach jeder neuen Dichotomie, d. h. nach jeder neuen Zerlegung des Raums in zwei Teile, verdoppelt sich die Anzahl der Gebiete fast, und dem Gedächtnis droht eine Überfüllung. Um das zu vermeiden, sieht das Programm von Brawerman eine Operation zur Erhöhung des Informationsgehalts vor, die darauf hinausläuft, dass alle die Teile der Hyperebenen beseitigt, sozusagen ausradiert werden, die entweder gleichnamige Gebiete teilen oder ein Gebiet von einem bisher "unerkannten" Bereich abgrenzen.

Natürlich geht dabei Information verloren, aber dafür schafft die Maschine Platz für neue wertvolle Nachrichten, für Ergebnisse neuer Erfahrungen.

Einem aufmerksamen Leser muss klar sein, dass die Maschine "in Wirklichkeit" keine mehrdimensionalen geometrischen Gebilde zeichnet und ausradiert. Sie operiert nur nach bestimmten Regeln mit Nullen und Einsen, die den einzigen Inhalt ihres Gedächtnisses ausmachen. Aber

um diese Regeln aufzustellen, ist es erforderlich, die allgemeinen theoretischen Verhältnisse zunächst in die Sprache der mehrdimensionalen Geometrie und dann in die der Arithmetik und Logik zu übersetzen.

Experimente mit dem Programm von Brawerman waren erfolgreich. Zur Zeit wird das Programm vervollkommnet. Es kann zum Erkennen von Buchstaben, Zeichnungen, Flugzeugsilhouetten und beliebigen Situationen verwendet werden.

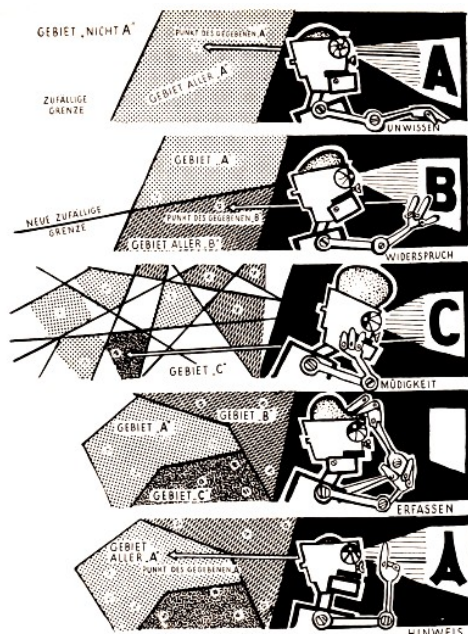


Bild 16.8.: Eine Darstellung der "geometrischen" Arbeitsweise einer erkennenden und abstrahierenden Maschine, wie sie von dem sowjetischen Mathematiker E. Brawerman vorgeschlagen und realisiert wurde. Jede Situation wird durch einen Punkt in einem mehrdimensionalen Raum gekennzeichnet. Die Maschine zieht auf gut Glück Hyperebenen, die Gebiete gegeneinander abgrenzen. Die Maschine verbessert das Modell nach und nach durch Versuche und erhöht den Gehalt der gespeicherten Information - sie streicht die überflüssigen Abschnitte der Hyperebenen.

Um vollständig selbständig zu arbeiten, muss eine Maschine aber Verhaltenskriterien und Voraussetzungen zur Sammlung von Erfahrung besitzen.

Eine Maschine hat eigene Bedürfnisse und eine eigene Fähigkeit, die Umwelt, in der sie lebt, in verschiedenartiger Weise zu verändern. Unsere "Spinne" z. B. muss sich um jeden Preis Energie verschaffen. Versorgt man sie im Überfluss mit "Nahrung", so wird sie sich, wenn ihr "Gehirn" bzw. ihr Programm das zulässt, kaum anders verhalten als ein dicker Hauskater, der fast immer schläft. Schickt aber ein Relais an ihrem Akkumulator besorgte Hungersignale in das Gehirn, so wird sie ganz unerwartete Versuche unternehmen, um diesen Signalen ein Ende zu setzen.

Die stochastische Arbeitsmethode ihres Gehirns tritt vermutlich auch in einigen unerwarteten Verhaltensweisen in Erscheinung. So wird man bei ihr sicher ein Interesse für einfachste Rhythmen, für Regelmäßigkeiten, die sich leicht auf Wiederholungen prüfen lassen, feststellen können.

Alle neuen, völlig unerwarteten Dinge werden ihre Neugier erregen, und solange sie diese nicht wenigstens teilweise erkennt und mit schon bekannten Teilen des inneren Modells zu einem System verbindet, wird die "Spinne" ebenso unruhig erscheinen wie bei Hunger.

Ein automatisches System mit einem inneren Modell der Umwelt sowie der damit verknüpften Fähigkeit zur Erhöhung des Informationsgehaltes unterscheidet sich also in sehr vielen Zügen des Verhaltens und der Informationsverarbeitung von gewöhnlichen programmierten und reflektorischen Automaten.

Die Nachrichten, die in der Steuereinrichtung eines solchen Systems eintreffen, werden nicht mehr eindeutig mit Handlungen verknüpft. Sie treffen dort auf ein Modell der Umwelt, finden ihren Platz in diesem Modell und beseitigen Nichtübereinstimmungen zwischen dem Modell und der Umwelt.

Die logischen Operationen sind nicht mehr einfach auf eine Umformung der Nachrichten in Befehle ausgerichtet: Sie vervollkommen das Modell im Innern.

Die Befehle, die zu Handlungen führen, sind nicht mehr unbedingt auf die Verwirklichung einfacher Ziele gerichtet: Viele von ihnen werden von dem Bedürfnis des Modells diktiert, in ihm entstandene Unbestimmtheiten zu beseitigen, und das System wird zum aktiven Experimentieren, zum Handeln um der Erkenntnis willen fähig. Die Zweckmäßigkeit seines Verhaltens erhöht sich infolge aller dieser Komplizierungen und lässt sich theoretisch unbegrenzt vervollkommen.

Man kann voraussehen, dass in dem Verhalten unseres kleinen Modells, unserer "Spinne", bei einem Irrtum im Erkenntnisprozess noch eine sehr eigenartige Eigenschaft zutage tritt. In einigen Fällen wird das Steuerungssystem für einen Moment bei der Identifizierung selbst von gut bekannten Gegenständen und Beziehungen innehalten und diese dann ungestüm fortsetzen, so als ob es für einen Augenblick an einem Hindernis hängengeblieben sei und sich dann durch einen Ruck losgerissen hätte.

Der Effekt eines momentanen Nichterkennens, auf das die Freude des weitgehenden Erkennens der Situation folgt, ist der Psychologie bekannt - es ist ein Effekt, der bei Menschen mit Humor manchmal ein Lachen hervorbringt.

Der Leser hat das Recht zu zweifeln: Wird das Verhalten der noch nicht existierenden Spinne nicht zu bestimmt beschrieben? In der Tat leitet sich ihr Verhalten nur aus einer inhaltlichen Deutung eines gewissen "stochastischen Modells" her, aber wir haben früher am Beispiel des Aussagenkalküls gesehen, dass Modelle bei einer entsprechenden Interpretation Aussagen über Dinge liefern können, an die man beim Aufbau des Modells nicht gedacht hat.

Natürlich müssen solche Aussagen unsicher bleiben, solange man sie nicht in der Praxis überprüft hat. Das Wort hat das Experiment.

Hätte der Verfasser diese allgemeine Methode nicht benutzt, so gliche er einem Alchimisten, der jemandem das Geheimnis aufschwätzt, wie man Gold in unbegrenzter Menge herstellen könne, und dafür nur ein paar Goldmünzen verlangt. Das Buch muss schließen, ehe die Unsicherheit seiner Aussagen gefährlich wird.

Letzten Endes sind alle Bilder, Versuche und Beispiele, die hier angeführt wurden, nur dann gerechtfertigt, wenn der Leser eine hinreichend klare Vorstellung davon erhalten hat, was Kybernetik ist.

Und was ist Kybernetik nun? Welche allgemeinen Gesetze haben wir ausnahmslos bei jedem Vorkommen eines Automatismus in der Technik und in der lebenden Natur beobachtet?

Wir nehmen ein mathematisches Modell zu Hilfe. Wir stellen uns etwas vor, das "System" genannt wird und aus Elementen besteht, die untereinander engere Bindungen besitzen als die Elemente, die nicht zu eben diesem "System" gehören. Unter "Elementen" und "Bindungen" kann man bei einem vernünftigen Herangehen an die Sache verstehen, was man will.

Wir modellieren die Elemente des Systems beispielsweise durch weiße und schwarze Kügelchen, die auf ein Tablett geschüttet sind. Das Tablett ist nicht völlig mit Kügelchen bedeckt, es gibt freie Stellen. Schaukelt man das Tablett etwas, so rollen die Kügelchen und stoßen aneinander. Es handelt sich also um ein dynamisches und stochastisches System, das aus unterscheidbaren Elementen besteht.

Schaukelt man das Tablett melancholisch, so kann man sich mit der Zeit davon überzeugen, dass das Modell der intuitiven Vorstellung von Kybernetik nicht entspricht. Es unterliegt in keiner Weise den Gesetzen der Kybernetik. Es ist ein Modell der statistischen Physik. Wir suchen daraufhin Zuflucht bei einem künstlichen Verfahren, das keine inhaltliche Deutung besitzt. Wir ordnen die Kügelchen in Form eines Ornaments an, dessen Wahl unserem Geschmack überlassen ist. Wir nehmen nun mit einer Filmkamera den allmählichen Zerfall unseres Werks bei unregelmäßigem Schaukeln des Tabletts auf, wir filmen das Wachstum der Entropie, das die statistische Physik voraussagt.

Dann nehmen wir den Film aus der Kamera, entwickeln ihn und legen ihn in einen Projektor ein, der sich mit einem Hebel auf "vorwärts" bzw. "rückwärts" stellen lässt. Wir deuten weder den Projektor noch den Hebel inhaltlich. Aber das Bild auf der Leinwand, das ist ein Modell eines beliebigen kybernetischen Systems.

Lassen wir den Apparat "vorwärts" laufen, so stellen wir fest, dass auch in der Kybernetik die von der Physik aufgezeigte Tendenz zum Zerfall, zum Wachstum der Entropie besteht. Durch ein ständiges Umstellen des Hebels "vorwärts - rückwärts" demonstrieren wir die Grundeigenschaft der Rückkopplung, nämlich diese Tendenz zu beseitigen, die gestörte Ordnung wiederherzustellen, die Nichtübereinstimmung zwischen der früheren und der neuen Lage der Kügelchen zu beseitigen. Die Entropie bleibt dabei konstant.

Lassen wir den Film vom Ende bis zum Anfang durchlaufen, so beobachten wir den Prozess der Selbstorganisation, der einer Verringerung der Entropie gleichwertig ist.

Die Kybernetik ist also die Lehre von den Systemen, deren Dynamik der Umkehrung der physikalischen Zeit gleichwertig ist. Natürlich ist diese Definition sehr formal.

Die physikalische Zeit ist praktisch nicht umkehrbar. Aber die kybernetischen Systeme verhalten sich so, als ob bei ihnen der Zeitablauf umgekehrt wäre. Die langen Beschreibungen praktischer Beispiele der Selbstorganisation und Selbstvervollkommnung lassen sich so ökonomisch in einem dynamischen Bild zusammenfassen. Man muss nur daran denken, dass es sich um ein formales, um ein vereinbartes Bild handelt.

Die inhaltliche Deutung dieses formalen Bildes bildete den Inhalt des ganzen Buches, und je anschaulicher die Deutung ist, desto ungenauer ist sie. Ein Element ist ein Element und sonst nichts, dagegen sind Relais, Neuronen und erst recht Handlungen und Ideen verschiedene Dinge mit vielen Eigenschaften, Unterschieden und vorläufig ganz unbekanntem Einzelheiten. Hier gehen die Meinungen mitunter auseinander, hier bedarf vieles noch der Präzisierung.

Bei der großen Kybernetikdiskussion, die vor kurzem geführt wurde, waren zwei angesehene Professoren - A. Kolmogorow und E. Kolman - verschiedener Meinung über einen Gegenstand, der scheinbar gar nicht in den Bereich der exakten Wissenschaften fällt.

A. Kolmogorow vermutete, dass wir, die Menschen vom Planeten Erde, sicher eines Tages vernünftigen Bewohnern anderer Planeten begegnen werden, die vollkommen anders gebaut sind als wir, und dass uns dann die Kybernetik helfen wird, mit diesen Wesen Kontakt aufzunehmen. E. Kolman erwiderte: Bei Wesen aus anderen Welten muss auch eine "andere Kybernetik" existieren, die zu ergründen sehr schwierig sein wird. Es scheint mir, dass dieser Einwand zwar

sehr wichtig, aber doch völlig unberechtigt war.

Warum fasst die Kybernetik in ihren Schlussfolgerungen Objekte zusammen, die ihrer Herkunft nach so verschieden sind, wie Pflanzen, Tiere, Menschen und automatische Maschinen?

Warum betrachtet sie alle Maschinen, die zu den verschiedensten Zwecken gebaut worden sind, gleichzeitig? Haben denn die raffinierte Schöpferkraft der Natur oder Her kühne Gedanke des Erfinders bisher etwas schaffen können, das nicht in den Rahmen der kybernetischen "Dogmen" passt?

Sie haben es nicht gekonnt. Es gibt keine Ausnahme von der Kybernetik und kann keine geben, vorausgesetzt natürlich, dass diese Wissenschaft selbst richtig und nicht engstirnig aufgebaut wird. Es gibt keine "andere Kybernetik" für wen auch immer, und es kann auch keine geben, solange die Grundgesetze der Natur für das ganze Weltall gelten.

Maschinen und Lebewesen unterliegen in Bezug auf die Informationsverarbeitung den gleichen Gesetzen, die von niemandem geändert werden können. Unsere Ansichten, unsere Formulierungen der Naturgesetze können sich ändern, aber nicht die Gesetze selbst.

Natürlich stimmt die konkrete Realisierung dieser Gesetze weder bei verschiedenen Maschinen, beispielsweise bei mechanischen und elektrischen Systemen, noch bei verschiedenen Lebewesen, beispielsweise bei Blumen und Schmetterlingen, überein. Vergleicht man die, Eigenschaften lebender und künstlicher Automaten, so kann man zwischen ihnen einige wesentliche Unterschiede feststellen.

Einer automatischen Maschine kann man den Vorzug der vollständigen Logik und Zweckmäßigkeit ihres Bauplans nicht absprechen. Überall, wo es möglich ist, wird in ihr die kreisende Bewegung verwendet. In ihr findet man keine rudimentären Organe, d. h. solche, die irgendwann einmal einen Zweck hatten, aber dann durch die Entwicklung überflüssig wurden, wie etwa der Wurmfortsatz des Blinddarms.

Wir könnten vielleicht durchaus ohne solche Unvollkommenheiten unseres Körpers wie andauernde Zahnschmerzen auskommen, aber der Plan des Körpers ist so gut verborgen, dass wir ihn nicht so bald werden lesen und verbessern lernen.

Eine Maschine ist haltbar und widerstandsfähig, sie kann sogar unter kosmischen Bedingungen arbeiten. Seit die grundlegenden Steuerkanäle der Maschinen auf elektrischer Basis arbeiten, können sich die Signale in ihnen mit einer Geschwindigkeit von  $300000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  bewegen, während die Signale in den Nervenbahnen kaum Geschwindigkeiten von  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  erreichen.

Eine Maschine kann stillgelegt werden, angehalten werden und wieder in Gang gebracht werden; ihre Einzelteile sind ersetzbar. Sie besitzt eine praktisch unbegrenzte Kraft, sie erhält Nahrung von billigeren und bequemeren Energiequellen als ein Arbeitspferd oder ein anderes Tier.

Die Wandlungsfähigkeit der Maschinen, die Möglichkeit, sie in der Ausführung ganz den verschiedenen Aufgaben der Praxis anzupassen, kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Schließlich sind die Steuerungskanäle einer Maschine einer beliebigen Einwirkung unsererseits leicht zugänglich, und das ist nicht nur deshalb wichtig, damit nicht die Gefahr besteht, dass sie sich plötzlich eigensinnig oder bösartig verhält. Wir können ihr Signalsystem eng mit den Signalsystemen anderer Maschinen verbinden und ihre konstruktive Isolierung überwinden. In modernen Aggregaten, automatischen Strecken und Abteilungen ist es manchmal schwer festzustellen, wo die eine Maschine endet und die andere beginnt.

Ein Pferdepaar dagegen, das sind immer zwei Pferde und nicht ein Pferd mit doppelter Kraft.

Vor Zeiten hat Otto von Guericke die Kraft des Luftdrucks an den berühmten "Magdeburger

Halbkugeln" gezeigt, aus denen die Luft herausgepumpt war. Stiche aus der damaligen Zeit zeigen viele Pferde, die diese Halbkugeln nach entgegengesetzten Seiten ziehen und sie nicht auseinanderreißen können.

Die Maler haben die Anzahl der Pferde, gelinde gesagt, übertrieben - es waren nicht mehr als acht.

Die Bildung der natürlichen Automaten erfolgte von Anfang an ohne äußeren Willen, sie waren von vornherein vollständige Automaten, ihr Automatismus war fähig, ihre Existenz in allen typischen Varianten der Wechselwirkung mit der Umwelt zu sichern.

Die künstlichen Automaten entstanden im Gegensatz dazu auf der Grundlage einfacher Eigenschaften der anorganischen Welt und ihrer Stoffe. Ihre Struktur wurde von der Schöpferkraft des Menschen entwickelt. Diese Struktur war weit davon entfernt, mit allen Zuständen der komplizierten Umwelt, in der der Schöpfer der Automaten - der Mensch - lebt, vollständig im Einklang zu stehen.

Daher sind die Entwicklungswege der natürlichen und der künstlichen Automaten verschieden; die gleichen Prinzipien, die jeder Steuerung zugrunde liegen, verkörpern sich in der Konstruktion der einen und der anderen in verschiedener Reihenfolge.

In der Tat haben die lebenden Automaten Vorteile, die die Maschinen nicht besitzen. Ein Tier reproduziert sich selbst, und in dieser seiner Eigenschaft steckt auch die wertvolle Möglichkeit der Selektion, die zur Entwicklung, zur Selbstentfaltung der Art führt. Einzelne Zellen, Gewebe und manchmal sogar ganze Organe können von dem Lebewesen regeneriert werden.

Keine zerbrochene Pleuelstange wächst von selbst wieder zusammen, Autoreifen wirken ihrer Abnutzung nicht (durch Nachwachsen) entgegen, aber bei einer Eidechse wächst z. B. sogar ein neuer Schwanz anstelle des abgerissenen.

Wir können bisher noch keine Akkumulatoren herstellen, die sich in Bezug auf die Fähigkeit, Energie zu speichern, mit lebenden Organismen messen könnten (übrigens werden die letzten Errungenschaften auf dem Gebiet der Atomtechnik diesen Unterschied wahrscheinlich bald beseitigen).

Lebende Automaten können Nahrungsmittel herstellen, die synthetisch herzustellen so schnell nicht gelingen wird. Bei aller Kompliziertheit ihres Aufbaus zeichnen sich die lebenden Automaten vorteilhaft dadurch aus, dass diese Kompliziertheit die Entwicklung einiger sehr einfacher Prinzipien darstellt, die sich vielfach und einförmig in verschiedenen Kombinationen wiederholen.

Es ist bekannt, dass eine Maschine nicht alles kann. Sie kann nicht die Naturgesetze verletzen. Daher gibt man die Grundgesetze der Natur häufig in folgender Form an:

"Es ist unmöglich, eine Maschine zu bauen, die ... usw."

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie kann man als Satz von der Unmöglichkeit des "Perpetuum mobile erster Art" formulieren. Eine der Formulierungen des Satzes vom Wachstum der Entropie besagt die Unmöglichkeit eines "Perpetuum mobile zweiter Art", das zwar nicht "Energie aus dem Nichts" schafft, aber die (eben nicht vorhandene) Möglichkeit benutzt, Energie nur durch Abkühlung eines Wärmereservoirs zu gewinnen.

Es ist unmöglich, eine Maschine zu bauen, die Information "aus dem Nichts" erzeugt.

Vor einigen Jahren erschien in einer sowjetischen Zeitschrift die Übersetzung der phantastischen Erzählung "Der Tolpatsch" von W. Morrison. In ihr wurde ein auf irgendeinem kleinen Planeten gefundenes Wesen beschrieben - "ein fester grauer Klumpen", dessen Scharfsinn und Logik für

die Menschen unerreichbar blieb.

Jeder Mensch, der diesem "Tolpatsch" eine Frage über seine Angelegenheit stellte, erhielt unverzüglich eine genaue Antwort und den besten Rat, wie er sich zu verhalten habe. Eine solche Maschine kann es nicht geben.

Jede Maschine, die Ratschläge erteilt, muss vorher eine hinreichend vollständige Information über die Lage der Dinge erhalten, und bei der Durchsicht der möglichen Verhaltensweisen macht sie bei einer solchen halt, die nach ihrem "Wissen" den Umständen am besten entspricht.

Aber ein System vom Typ "Tolpatsch" ist auch in der lebenden Natur nicht möglich, da auch die lebende Natur kein Gesetz des Weltalls verletzen kann. Das, was man in einer Maschine prinzipiell nicht verwirklichen kann, kann man auch in der Natur nie beobachten.

Alles, was in der Natur vor sich geht, werden wir mit wachsender Vervollkommnung unserer Kenntnisse zweifellos künstlich erzeugen können: die Reaktionen, die sich im Innern der Sterne abspielen, ebenso wie die Selbstreproduktion der weißen Blutkörperchen und komplizierte psychische Prozesse.

Wir können darüber hinaus auch das schaffen, was es in der uns umgebenden Natur nicht gibt, was aber ihren Gesetzen nicht widerspricht. Allerdings werden wir in einigen Fällen Bedenken haben, für unsere künstliche Schöpfung das Wort "Maschine" zu verwenden, beispielsweise bei einem zukünftigen künstlichen Eiweiß, aber das ist schon eine Frage der Terminologie, die das Wesen der Sache nicht berührt.

Bei dem Wort "Maschine" denkt man gewöhnlich an eine Anwendung mechanischer Bewegung; elektronische, ionische oder chemische Einrichtungen, in denen keine mechanische Bewegung stattfindet, sollte man vielleicht nicht als "Maschinen" bezeichnen. Aber alle Formulierungen vom Typ "es ist unmöglich, eine Maschine zu bauen ...." beziehen sich natürlich auch auf diese.

Es existieren keine Gründe, die uns prinzipiell daran hindern, beliebige Naturerscheinungen - einschließlich der höchsten, der psychischen - zu erkennen, zu messen oder zu reproduzieren. Diese "Gründe" sind Hirngespinnste von Menschen, die entweder nicht frei sind von einer mystischen Furcht vor dem heute noch Unbegreiflichen oder eigennützig Unwissenheit und Vorurteile ausnutzen; das Ergebnis dessen, was Pawlow das "schimpfliche Streben, der Wahrheit zu entgehen" nannte.

Manchmal wird gesagt, die Wissenschaft sollte keine Grenzen suchen und nicht auf dem Weg der fortschreitenden technischen Entwicklung Verbote aufstellen. Das ist natürlich falsch. Das Wissen besteht wie jede Information in Verboten gewisser denkbarer Fortsetzungen; mit der Kompliziertheit eines Prozesses wächst die Zahl der denkbaren Fortsetzungen in geometrischer Progression, und keine von ihnen zu verbieten, abzulehnen, das hieße sich selbst zu einem untätigen "Zerfließen des Denkens" zu verurteilen.

Die Entdeckung von Unmöglichkeiten in der Welt ist eine ebenso wichtige schöpferische Tat des Geistes wie die Ausnutzung der Möglichkeiten: Das sind zwei Seiten eines großartigen Prozesses.

Aus den Grundlagen der Physik folgt, dass Maschinen immer der Energiezufuhr bedürfen und die Energie mindestens teilweise in Wärme verwandeln werden. Aus den Grundlagen der Kybernetik folgt, dass Maschinen auch in Zukunft niemals "aus sich selbst heraus" Information erzeugen können.

Aber Maschinen sind nicht nur kybernetische und physikalische Systeme. Sie sind auch ein Teil der Technik, der materiellen Basis der menschlichen Existenz. Wenn wir rein theoretische Modelle ausschließen, so erweist sich als Haupteinschränkung die Tatsache, dass die Einmischung des Menschen in die Tätigkeit der Maschinen prinzipiell nicht zu beseitigen ist.

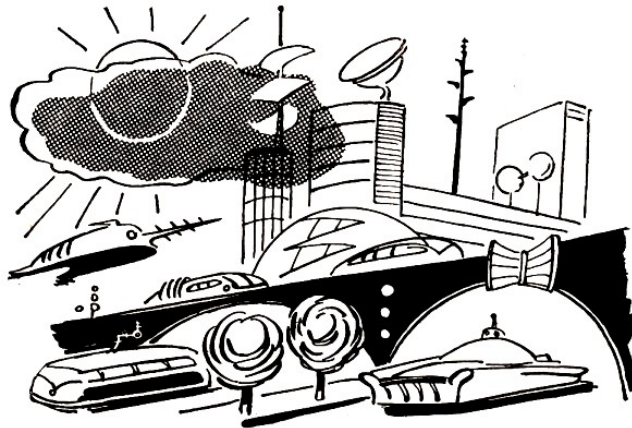
Eine absolute Automatisierung ist unmöglich, so wie beispielsweise die absolute Unabhängigkeit des gesellschaftlichen Menschen von der Gesellschaft, so eine Art Robinsonade mit staatlicher Beköstigung, unmöglich ist. Wir können die Einmischung des Menschen in die Arbeit der Maschine auf ein Minimum reduzieren, aber sie bleibt immer vorhanden, zumindest im Prinzip.

Die Programmierung, die Beobachtung, die eventuelle Reparatur und die Sorge um die Wiederherstellung und Vervollkommnung der Maschinen muss nicht unvermeidlich dem Menschen auferlegt bleiben - das sind zeitweilige Funktionen, die er heute ausüben muss, sie sind durch die Unzulänglichkeit der technischen Mittel bedingt.

Aber der Wille des Menschen ist für die Maschinen immer notwendig, das folgt schon aus dem Begriff "Technik" selbst und aus den von der Menschheit entwickelten Prinzipien der gesellschaftlichen Ordnung.



## 17 Kybernetik und Mensch, ein philosophischer Abschluss eines wissenschaftlich-technischen Buches



Der Name unseres Zeitalters - Zur Entstehung der Kybernetik - Wissensgebiete, auf die die Kybernetik aufbaut - Dämonisierung der Technik - Warum wurde die Kybernetik hin und wieder abgelehnt? - Kann eine Maschine denken? - Philosophische Entscheidung - Ist der Mensch ein Automat? - Kann die Maschine klüger sein als der Mensch? - Automat und Mensch.

Tiefgreifende politische und ökonomische Umwälzungen, bedeutsame wissenschaftliche Entdeckungen und Erfindungen, kühne technische Leistungen geben bestimmten Zeitabschnitten in der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft oft ihren Namen.

Vor einhundert Jahren entwarfen Karl Marx und Friedrich Engels auf der Grundlage ihrer eingehenden Untersuchungen der Entwicklungsgesetzmäßigkeiten der Menschheit ein wissenschaftliches Programm, das in der Folge für Millionen Menschen zur Richtschnur ihres Handelns wurde. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts vereinigten sich die Arbeiter in revolutionären Arbeiterparteien und machten sich unabhängig vom ideologischen und politischen Einfluss der herrschenden Bourgeoisie.

In langwierigen, schweren und harten Klassenkämpfen errang das Proletariat in vielen Ländern der Welt die politische Macht. Als ersten gelang dies im Oktober 1917 den russischen Arbeitern, Bauern und Soldaten.

Unsere Zeit ist die Epoche des Übergangs von der alten kapitalistischen zur neuen sozialistischen Gesellschaftsordnung. Sie ist die Epoche der Befreiung der Menschen der ganzen Welt von Ausbeutung, Unterdrückung und Krieg.

Neben dieser wichtigsten Klassifizierung der Entwicklungsstufen der menschlichen Gesellschaft gibt man den Zeitabschnitten auch Namen, die unter anderen Gesichtspunkten, etwa denen der Entwicklung der Wissenschaft, Technik und Produktion, ausgewählt wurden.

Norbert Wiener nennt beispielsweise in seinem Buch Kybernetik das 17. und das frühe 18. Jahrhundert das Zeitalter der Uhren, das späte 18. und das 19. Jahrhundert das der Dampfmaschine. Das 20. Jahrhundert bezeichnet er als das Zeitalter der Regelung und Nachrichtenübertragung.

Man muss sich jedoch stets der Tatsache bewusst sein, dass man mit einer der zuletzt genannten Bezeichnungen die jeweilige Epoche nur recht einseitig charakterisiert, während die Bezeichnung des Standes der gesellschaftlichen Entwicklung umfassender und vielseitiger ist. Die sich im 19. Jahrhundert rasch entwickelnde Industrie brauchte Dampfmaschinen für die

neuen Fabriken, Lokomotiven, Schiffskessel und Motoren für den Ausbau der Transportmittel, Werkzeugmaschinen für die übrige metallverarbeitende Industrie, Landmaschinen für die Mechanisierung der Landwirtschaft usw.

Nachdem schon Ende des 19. Jahrhunderts das Telefon entwickelt werden war, brachte das gegenwärtige Jahrhundert den Rundfunk, den Film, das Fernsehen und die Rechenmaschine hervor. In den Vordergrund trat die Technik der Übermittlung und Verarbeitung von Nachrichten, die Steuerung und Regelung von Systemen und Prozessen in der Technik und Gesellschaft.

Aber das 20. Jahrhundert ist nicht nur durch die Leistungen der Nachrichten- und Automatisierungstechnik gekennzeichnet, sondern auch durch die Entdeckung der Kernspaltung und durch die Entwicklung der Raketentechnik. Heute ist es üblich, unsere Zeit das Weltraumzeitalter, das Zeitalter des Atoms, der Rechenmaschine und der Automation zu nennen.

Die Anwendung der Ergebnisse der Atomforschung und der Nachrichten- und Automatisierungstechnik hat eine derart weitreichende Bedeutung für die weitere Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, dass man sicher ohne Übertreibung sagen kann: Durch sie wird das künftige Antlitz der Zivilisation geprägt.

Die Entwicklung der modernen Wissenschaft scheint sich zu überstürzen. Täglich wird von neuen Entdeckungen und Erfindungen berichtet. Die Wissenschaften, besonders deren Grundlagendisziplinen, weisen auf immer weitreichendere Möglichkeiten in der Forschung und der Anwendung wissenschaftlicher Ergebnisse in der Produktion und Technik hin. Die Bedeutung vieler dieser Erkenntnisse kann heute gar nicht voll abgeschätzt werden.

Nicht immer kündigen sich neue wissenschaftliche Entdeckungen durch furchtbare Explosionen an, wie im Falle der am 15. Juli 1945 auf dem Versuchsgebiet "Jornada del Muerte" (Tagewerk des Todes) gezündeten ersten Atombombe oder der wenige Wochen später am 6. und 9. August auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki aus amerikanischen B-29-Bombern abgeworfenen Atombomben, die blühende Städte in Minuten in Schutt und Asche legten.

Leise und zunächst von vielen Menschen kaum bemerkt, drang eine andere große wissenschaftliche Entdeckung in das Leben der Menschen ein: die informationsverarbeitende Maschine.

Die Konstruktion und der Bau dieser Maschinen ist von nicht geringerer Bedeutung als die Entdeckung der Kernspaltung. Ohne diese informationsverarbeitenden Maschinen hätten seit dem denkwürdigen 4. Oktober 1957, des Startes des ersten künstlichen Erdsatelliten, weder Mess-, Bio-, Nachrichtensatelliten noch interplanetare Stationen, noch bemannte Weltraumraketen die Erde auch nur einmal umkreisen können. Diese "Intelligenzverstärker"-Maschinen, wie sie der englische Kybernetiker W. Ross Ashby benannt hat, sind ein untrennbarer Bestandteil unseres Zeitalters.

Diese modernen Maschinen sind keine Vernichtungsmittel, wie etwa die Atombombe. Ihr Wert für militärische Zwecke ist aber von enormer Bedeutung. Jede Rakete, die auf irgendein Ziel gerichtet ist, wird von diesen Rechenmaschinen "mit sicherer Hand" in das vorausbestimmte Ziel gebracht.

Der Mensch vermag wohl alle seine Entdeckungen und Erfindungen zum Nutzen oder zum Schaden der Menschheit einzusetzen. Das ist eine Tatsache. Die Gefahr der Vernichtung der Menschen ist angesichts der Kriegsdrohungen imperialistischer Kräfte in einigen kapitalistischen Ländern allgegenwärtig.

Diese Gefahr eines atomaren Vernichtungskrieges klar erkennend, haben es sich die kommunistischen und Arbeiterparteien und alle fortschrittlichen Menschen der Welt zur Aufgabe gemacht, die Bürger aller Länder über die furchtbaren Auswirkungen eines nuklearen Krieges aufzuklären

und sie gegen den Krieg zu aktivieren.

Die Begriffsbildungen der Kybernetik waren bis vor kurzem der breiten Öffentlichkeit noch wenig bekannt. Seit Anfang der fünfziger Jahre bemühen sich in steigendem Maße Wissenschaftler in vielen Ländern, die abstrakten Begriffe und Formeln der Kybernetik einem größeren Leserkreis in verständlicher Form nahezubringen.

Die Grundlagen der Kybernetik wurden vor und während des zweiten Weltkrieges von Wissenschaftlern der verschiedensten Fachgebiete teils unabhängig voneinander, teils in gemeinsamer Arbeit geschaffen.

Bereits 1925 beschrieb der Biologe R. Wagner das Prinzip der Rückkopplung für die Funktion der Vorderhornanglienzellen bei der Willkürbewegung. In den Jahren 1936 und 1937 sammelte der berühmte amerikanische Mathematiker Norbert Wiener einen kleinen Kreis von Physikern, Physiologen, Mathematikern und Nachrichtentechnikern um sich.

In den regelmäßigen Zusammenkünften diskutierte diese Gruppe einige Prinzipien der kybernetischen Betrachtungsweise.

Im Jahre 1943 veröffentlichte Wiener gemeinsam mit seinem Freunde, dem mexikanischen Physiologen Arthur Rosenbluth und dem Ingenieur Julian Bigelow in der amerikanischen Zeitschrift "Philosophy of Science" einen Artikel unter dem Titel Behaviour, Purpose and Teleology (Verhalten, Ziel und Teleologie).

In diesem Artikel untersuchen die Autoren das Verhalten solcher Systeme, das auf die Erreichung eines bestimmten Zieles (Endzustandes) gerichtet ist. Systeme mit einem solchen Verhalten nennt man - wie wir schon wissen - zielstrebige Systeme.

Norbert Wiener war bestrebt, Probleme, die in verschiedenen Wissenschaften, z. B. der Technik, Biologie und Mathematik, eine Rolle spielen, mit den gleichen Methoden exakt zu untersuchen. Dieses Bemühen um ein einheitliches Herangehen an die zu erforschenden Objekte führte im Winter 1943/44 in Princeton die Vertreter verschiedenster Spezialdisziplinen zusammen.

An dieser Beratung, die auf Initiative von Norbert Wiener und John von Neumann zustande kam, nahmen neben Wiener, Neumann und Pitts als den Vertretern der Mathematik die Physiologen McCulloch und Charles Lorente de No und der Fachmann für Rechentechnik, Goldstine, teil.

Beschlossen wurde ein gemeinsames Arbeitsprogramm, in dem die nächsten Aufgaben und Ziele auf dem Gebiet der Kybernetik formuliert wurden. Seit 1946 wurde diese gemeinsame Arbeit, an der sich immer mehr Fachleute aktiv oder beratend beteiligten, auf den in regelmäßigen Abständen stattfindenden Konferenzen zu Fragen der Kybernetik zielstrebig fortgesetzt.

Die Ergebnisse dieser Konferenzen wurden in den Protokollen Cybernetics veröffentlicht.

Die nun schon ein Jahrzehnt von Wiener und anderen durchgeführten Forschungen ermöglichten es ihm, 1948 sein grundlegendes Werk "Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine" zu veröffentlichen.

Ein Jahr zuvor hatte er anlässlich einer Europareise noch Gelegenheit, seine neuen Ideen mit führenden Wissenschaftlern wie Turing, Bartlett, Blanc-Lapiers u. a. zu erörtern.

Obwohl bereits im 19. Jahrhundert und früher theoretische und praktische Ansätze einer kybernetischen Betrachtungsweise zu finden sind<sup>69</sup>, führte aber erst die Integration der Methoden

---

<sup>69</sup>Bereits seit dem 17. Jahrhundert wurden mechanische Geräte von Pascal, Stanhope, Leibniz, Marquand u. a. konstruiert, die einfache logische oder arithmetische Operationen realisieren. Eine erste theoretische Darstellung eines Regelmechanismus lieferte C. Maxwell, als er sich 1868 mit dem Regler an der Dampf-

der Regel-, Informations-, System- und Spieltheorie<sup>70</sup> nach einem einheitlichen Gesichtspunkt zur Begründung der kybernetischen Betrachtungsweise.

Viele Autoren fassen den Untertitel zu Wieners Buch *Kybernetik, Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine* als Definition des Gegenstandes der Kybernetik auf. Aber wie Wiener später selbst dazu bemerkte<sup>71</sup>, wollte er damit gar keine Definition dieser neuen Wissenschaft liefern, sondern nur zum Ausdruck bringen, dass man an gewisse Probleme der Technik, Biologie, Psychologie usw. einheitlich herangehen sollte.

Seit Ende der vierziger Jahre wuchs rasch die kybernetische Literatur an. Führende Wissenschaftler, z. B. Ashby und Ducroque, gaben Einführungen<sup>72</sup> in diese neue Wissenschaft und veröffentlichten neue Forschungsergebnisse. Das große Interesse für die kybernetischen Fragestellungen und Methoden, das man nun in vielen Ländern beobachten konnte, vereinigte im Juli 1956 in Namur (Belgien) die verschiedensten Wissenschaftler zum ersten internationalen Kybernetikkongress. Mehr als 800 Interessenten nahmen daran teil.

In vielen Ländern haben sich inzwischen Arbeitsgemeinschaften für Kybernetik gebildet, die es sich zur Aufgabe machen, die Zusammenarbeit der an der gemeinsamen Grenzlinie liegenden Wissenschaften durch gemeinsame Tagungen und durch die Herausgabe von Fachzeitschriften, Sammelbänden und dergleichen zu fördern.

In der DDR erscheinen seit 1961 in deutscher Übersetzung die Beiträge der sowjetischen Zeitschrift *Probleme der Kybernetik*. Seit 1965 wird von der Sektion für Kybernetik beim Präsidium der Deutschen Akademie der Wissenschaft zu Berlin und der Mathematischen Gesellschaft der DDR die Zeitschrift: *"Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik"* herausgegeben.

Die Kybernetik blieb aber von der in allen Wissenschaften fortschreitenden Differenzierung nicht verschont. Die rasche Entwicklung der Kybernetik führte bald zur Herausbildung spezifischer Problemkreise und damit auch zur Entstehung von Teildisziplinen der Kybernetik, z. B. der Neurokybernetik, der mathematischen Linguistik und Bionik. Wie in den meisten anderen Wissenschaften, gibt es heutzutage kaum noch einen Fachmann, von dem man sagen könnte, er beherrsche den Gesamtbereich der Kybernetik.

Zu den Wissensgebieten, auf die die Kybernetik aufbaut, rechnet man allgemein einige spezielle mathematische Disziplinen wie die Informationstheorie, die Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mathematische Logik, die Theorie der Algorithmen und die Spieltheorie.

Ferner gehören dazu die Technik der Nachrichtenübermittlung und die Automatisierungstechnik, deren Hilfsmittel unter anderem die Technik der automatischen Messwerterfassung, die Regelungstechnik und die Herstellung von Digital- und Analogierechenmaschinen sind.

Die Vorrangstellung der Mathematik innerhalb des Gesamtkomplexes der Kybernetik ist nicht zu übersehen. Sie erklärt auch das verstärkte Eindringen der Sprache der Mathematik und

---

maschine beschäftigte. Im gleichen Jahr entdeckten Hering und Breier die Selbstregelung der Atemreflexe. Vgl. hierzu A. W. Chramoi *Zur Entwicklungsgeschichte der Kybernetik*. In: *"Kybernetik und Praxis"*. Berlin 1963. In diesem Beitrag werden zahlreiche Daten zur Entwicklungsgeschichte der Steuerungs- und Regelsysteme in Technik und Physiologie geliefert.

<sup>70</sup>G. Klaus: *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Berlin 1964. Seite 16 f. und 22.

<sup>71</sup>R. Tarjan: Bericht über den III. Kybernetik-Kongress in Namur 1961 und über die heutigen Entwicklungstendenzen in der Kybernetik. In: *"Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik"*. Berlin 1963, Seite 303.

<sup>72</sup>W. Ross Ashby: *An Introduction to Cybernetics*. London 1956; Albert Ducroque: *Die Entdeckung der Kybernetik*. Frankfurt a. M. 1959.

mathematischen Logik in andere Bereiche, die kybernetische Erkenntnisse und Methoden anwenden. Für die Darstellung sehr vieler Gedankengänge wird in der Kybernetik die Sprache der Mathematik verwendet.

Die große Rolle, die die Technik in der Kybernetik spielt, hat leider das Missverständnis aufkommen lassen, als sollten durch die Anwendung kybernetischer Erkenntnisse Vorgänge eines Bereiches auf solche eines anderen zurückgeführt werden, z. B. Denkvorgänge auf physikalische.

Es gibt mehrere Gründe, die dieses Missverständnis erzeugt bzw. gefördert haben. Zwei Gründe mögen hier eine besondere Rolle gespielt haben, die simplifizierende Darstellung etwa von Problemen der Biologie oder Psychologie durch Kybernetiker<sup>73</sup> und das ungenügende Verständnis der Vertreter dieser Fachgebiete für die kybernetische Denkweise.

Es gibt aber noch einen anderen Gesichtspunkt für dieses Missverständnis. In vielen bürgerlichen Ländern konnte bzw. kann man ablehnende Reaktionen auf die sich durchsetzende kybernetische Denkweise beobachten. Immer wieder wird im Zusammenhang mit der Kybernetik die Gefährdung des Menschen durch die neue Maschinenwelt beschworen.

Diese Erscheinung ist nicht neu. In bürgerlichen Ländern gibt es Schriftsteller, die es sich zur Aufgabe gemacht haben, die Bösartigkeit der Technik in ihren Büchern zu beschwören. Unter anderen beurteilen der englische Schriftsteller Aldous Huxley, der spanische Philosoph Ortega y Gasset, der westdeutsche Schriftsteller Friedrich Georg Jünger, der englische Historiker Arnold J. Toynbee und der westdeutsche Philologe Ewald Wasmuth die Leistungen der Technik außerordentlich pessimistisch.

In ihren Reden und Büchern zeichnen diese Intellektuellen ein verzerrtes Bild des Verhältnisses des Menschen zur Technik. Ihre Argumente sind selten sachlich und nüchtern und ihre Reden sind meistens stark emotional betont.

Der Psychologe Otto Walter Haseloff berichtet, dass man in Westdeutschland in vielfältigen Variationen die "sich reproduzierende Klage über den heimatlosen, den angstvollen und ohne Mittel lebenden Menschen der technischen Zivilisation" hören könne.

An diesem allgemeinen Unbehagen gegenüber der Technik in der kapitalistischen Gesellschaft sind primär die gesellschaftlichen Verhältnisse des Kapitalismus schuld. Sie sind letztlich für die sozialen Folgen der Anwendung der Technik, für den geistigen und moralischen Zustand einer Gesellschaft verantwortlich. Diese Tatsache enthebt aber den Publizisten und Wissenschaftler nicht der Verantwortung, eine sachgemäße und korrekte Darstellung von dem Zweck, dem Nutzen und den vielfältigen Möglichkeiten für den Menschen zu geben.

Der Kreis der Intellektuellen in den bürgerlichen Ländern, die offen gegen den Missbrauch der Technik und gegen eine mystifizierende Deutung auftreten, ist nicht groß. In Westdeutschland gehören zu diesem Kreis der Mitentdecker der Kernspaltung, der Physiker Otto Hahn, und der Philosoph Max Bense.

Es soll hier auch nicht verkannt werden, dass unter denen, die die Technik pessimistisch beurteilen, auch solche Menschen sind, die aus sozialer und geistiger Verantwortung vor der Technik warnen. Sie befürchten, dass die Technik zur Vernichtung des Menschen eingesetzt wird.

Der militärisch nicht zu rechtfertigende Abwurf amerikanischer Atombomben auf japanische

---

<sup>73</sup>Die Simplifizierung ist natürlich nicht in jedem Falle ein unzulässiges methodisches Prinzip. Es kann sogar in manchen Fällen durch die Beseitigung überflüssiger Bedingungen, die die zu betrachtenden Zusammenhänge nur unnützlich verwirren, neue Einsichten schaffen.

Städte, der Einsatz von Napalmbomben und chemischen Kampfmitteln gegen die um ihre politische Freiheit und Unabhängigkeit kämpfenden Völker gibt sicher Grund zu dieser Sorge. Leider treffen die meisten Vorschläge, die diese Intellektuellen zur Überwindung dieses Problems "Mensch und Technik" machen, nicht den Kern der Sache.

Gewiss sind eine problemgerechte Darstellung der Technik und die Erziehung der Jugend zu einem neuen Ethos, das eine sinnvolle Nutzung der Technik fördert, nützliche Maßnahmen. Aber die Wurzeln des Übels, die kapitalistischen Produktionsverhältnisse, sind damit nicht beseitigt und damit ist auch der Missbrauch der Technik nicht ausgeschlossen.

Jenen Schriftstellern aber, die die Technik zum bösen Ungeheuer machen, das alle im Kapitalismus auftretenden gesellschaftlichen Übel verursacht, die bewusst dem Menschen schädliche Verhaltensweisen gegenüber der Beschäftigung mit der Technik und den mit ihr verbündeten Naturwissenschaften einreden wollen und ihn zu einer handwerklich-ständischen Lebensform zurückführen wollen, die den Menschen von seiner vornehmsten Aufgabe, die Naturkräfte zu erkennen und zum Nutzen der Gesellschaft anzuwenden, entbinden wollen, die in einer mittelalterlichen und vorindustriellen Ordnung die ideale Gesellschaft sehen, muss man unmissverständlich sagen, dass sie moralisch und sozial verantwortungslos handeln, dass sie reaktionäre Ideologie erzeugen.

Wir wollen jetzt einige Beispiele aus Büchern solcher Autoren anführen, um zu zeigen, dass unser Urteil nicht übertrieben ist. Wir können freilich nur wenige Beispiele bringen, und wir haben sie daher so ausgewählt, dass sie tatsächlich das wiedergeben, was die Autoren sagen wollen. Aus der großen Anzahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema beschränken wir uns auf Aussagen von Ewald Wasmuth und F. G. Jünger.

"... die neue Liebe zu den technischen Wunderwerken ist verderblich", daher müssen "wir nein sagen zu diesen Geschenken des menschlichen Geistes, des erfinderischen Genies ..."

Wasmuth, der dies geschrieben hat, verkennt hier den Zweck der Technik. Er versteht nicht, dass die Technik ein Existenzmittel des Menschen ist, mit dessen Hilfe der Mensch sein Wissen, seine Fähigkeiten und Fertigkeiten, seine Herrschaft über die Naturkräfte erweitert. Er sieht nicht, dass wir nicht nein sagen können zur Technik, wenn wir nicht die gesellschaftliche Entwicklung aufhalten wollen.

Wasmuth wünscht sich keine mittelalterliche Idylle, er will nicht in die Vergangenheit. Aber wohin will er dann? Er bleibt uns diese Antwort schuldig. Wasmuth spricht sich gegen die Technik aus, weil sie seiner Meinung nach die sittlichen Vorstellungen des Menschen trivialisieren und die zu schützenden Werte menschlicher Kultur gefährden. Das mag für die bürgerliche Gesellschaft in gewissem Sinne zutreffen, aber die Aussage bleibt in dieser verallgemeinerten Form deswegen doch falsch.

F. G. Jünger ist im Gegensatz zu Wasmuth ein Demagoge, der sich das Ziel gesetzt hat, dem Menschen einzureden, dass er ein Esel sei, der, wenn es ihm zu wohl geht, aufs Eis geht. Nach Jüngers Erfahrung ist der Mensch deswegen ein Esel, weil er sich mit der Maschine verbunden hat und nun glaubt, er würde fortan keine Armut mehr leiden.

Jünger weiß es besser, und er belehrt uns durch folgende Feststellung:

"An Beispielen, dass der Überfluss Beschwerden macht, ist kein Mangel, denn der Mensch ist dem Überfluss nicht gewachsen: er ist zu schwach, um ihn lange zu ertragen. Er erträgt die Notlagen besser, denn ihre Dürftigkeit ist es, die ihn erfinderisch macht."

Nun wissen wir es genau. Wir hätten lieber als Jäger und Sammler durch Wälder und Felder

streifen sollen und auf jedes Werkzeug, das uns die Arbeit erleichtert, verzichten sollen. Aber da wir nun schon einmal eine industrielle Gesellschaft haben, dann sollen wenigstens die Arbeiter im Kapitalismus den Besitzern von Kapital den Reichtum überlassen, denn die Not macht erfinderisch, und man lebt auch besser in ihr.

Das Streben nach sozialem Fortschritt, die Steigerung der Arbeitsproduktivität, die Entwicklung neuer Industrien - alles ist sinnlos, denn dem Überfluss an Gütern ist der Mensch nicht gewachsen.

Neben diesem Schreckgespenst der Technik vermittelt uns Jünger ein noch furchterregenderes. Er schreibt:

"Die Maschinerie arbeitet nicht einseitig zugunsten des Menschen; der Mensch, für den sie arbeitet, wird maschineller, und diese Maschinalität läuft darauf hinaus, den Menschen einzusparen."

Welchen Sinn hat wohl der Satz: "Die Maschinalität läuft darauf hinaus, den Menschen einzusparen."? Jünger lässt uns hierüber im Zweifel. Zum einen behauptet er, "die Technik ... stellt den Menschen in ihren Dienst", verwaltet, bewirtschaftet, verwertet und nutzt ihn aus; zum anderen ist es auch möglich, dass sie ihn frisst, denn sie ist Saturn gleich, der bekanntlich seine eigenen Kinder verschlang.

Welches furchtbare Schicksal Jünger auch dem Menschen zgedacht haben mag, er wird es nicht erleiden. Die gesamte Geschichte der Entwicklung des menschlichen Individuums und der Gesellschaft spricht dagegen.

Die marxistisch-leninistische Philosophie weist nach, dass die Geschichte der Menschheit ein gesetzmäßiger Entwicklungsprozess der Beherrschung der blinden Naturkräfte ist. eine Bewegung von niederen zu höheren Gesellschaftsformationen. Die Technik ist weder gut noch böse, sie ist auch nicht menschenfeindlich. Man kann sie daher auch nicht verantwortlich machen für alle Folgen, die sich aus ihrer Anwendung ergeben.

Das Problem Mensch und Technik führt uns zwangsläufig zu dem Thema, das wir jetzt skizzieren wollen: Die Beziehung zwischen Automat und Mensch. Dieses Problem hat in der Geschichte der Wissenschaften und besonders der Philosophie eine große Rolle gespielt, und man kann es weit zurückverfolgen bis zu den Anfängen des wissenschaftlichen Denkens in der Antike.

Zuvor aber wollen wir noch eine Frage diskutieren, die speziell den marxistischen Philosophen angeht. Es ist bekannt, dass es einige Philosophen gab, die die Kybernetik falsch beurteilten. Dies war ein ernster Fehler, der heute längst im Kreise marxistischer Philosophen überwunden ist.

Wie gesagt, es gab einige wenige Philosophen, die die Ansicht vertraten, die Kybernetik sei eine von den Ideologen des Imperialismus geschaffene Pseudowissenschaft, deren wichtigste Funktion gerade darin bestünde, die Herrschaft der Bourgeoisie über die Arbeiterklasse zu rechtfertigen.

Eine solche Behauptung ist nicht aufrechtzuerhalten. Diese Philosophen versuchten, die Wissenschaftler darüber zu belehren, was in der Wissenschaft möglich und was nicht möglich sei. Zum Beispiel wurde behauptet, ein nicht lebender Automat könne nur rein mechanische Operationen ausführen und die höheren, "schöpferischen" Funktionen des Gehirns, insbesondere alle Funktionen des zweiten Signalsystems, seien einer Analyse und Synthese prinzipiell nicht zugänglich.

Solche Urteile entsprechen nicht dem Geiste des Marxismus-Leninismus, und wir verurteilen sie heute. Weder Marx noch Engels und auch nicht Lenin haben in ihren Schriften behauptet, man könne die komplizierten Gehirnfunktionen nicht exakt analysieren und synthetisieren.

Den Klassikern des Marxismus-Leninismus lag es fern, den Wissenschaften irgendwelche Vorschriften zu machen. Wenn man sachgerecht über Forschungsgegenstand und Forschungsmethoden der Kybernetik urteilen will, dann kann man das nur, wenn man sich mit den Tatsachen vertraut macht und sich von der Leistungsfähigkeit der kybernetischen Methoden überzeugt.

Man kann eine Wissenschaft nicht deswegen ablehnen, weil ihre Forschungsergebnisse von verantwortungslosen Personen missbraucht werden.

Ebenso wie die Biologie nicht entwickelt wurde, um auf der Grundlage ihrer Resultate Rassen-theorien aufzubauen, ebensowenig ist die Kybernetik verantwortlich für die Auffassungen, in denen der Mensch zu einem ohne Gefühl, Gewissen und Verantwortungsbewusstsein ausgestatteten Roboter degradiert wird. Für den Missbrauch wissenschaftlicher Ergebnisse kann man nicht diese Ergebnisse selbst, verantwortlich machen, sondern nur die Personen und Machtgruppen, die sie absichtlich missbrauchen.

Zur Kybernetik äußerten sich auch einige Biologen, Physiologen, Ökonomen und Sprachwissenschaftler zunächst sehr skeptisch. Vielleicht waren sie schockiert über die kybernetischen Ideen und Methoden, vielleicht glaubten sie auch, mathematische, logische und technische Methoden lassen sich nicht in der Biologie, Physiologie, Ökonomie, Sprachwissenschaft usw. anwenden.

Wie dem auch sei, führende Vertreter der Einzelwissenschaften verhielten sich gegenüber dieser jungen Wissenschaft zunächst abwartend und kritisch. Diese kritische Haltung, die vor Jahren weit verbreitet war, kommentiert E. v. Holst in folgender Weise:

"Solche Kritik ist zum Teil psychologisch verständlich: Die 'Kybernetiker' schalten mit dem mühsam gehäuften Schatz von Einzelwissen sehr nach Gutdünken; und in populären Schriften wird überdies das nur formal Vergleichbare allzu leicht gleichgesetzt. Doch ist aus solch schroffer Ablehnung auch deutlich erkennbar, dass hier das wirkliche Anliegen einer solchen Systemtheorie nicht erkannt oder grundsätzlich nicht gebilligt wird."<sup>74</sup>

Diese kritische Einstellung zur Kybernetik mag auch der Grund sein, weshalb viele Biologen, Psychologen, Physiologen, Linguisten, Ingenieure und Mathematiker es verzogen, die Bezeichnung "Kybernetik" auch dann noch nicht zu verwenden, als sie selbst begannen, kybernetische Ideen zu verfolgen.

Es ist aber eines wirklichen und verantwortungsbewussten Wissenschaftlers nicht würdig, wenn er einer jungen und sich entwickelnden Wissenschaft Hindernisse in den Weg zu legen versucht. Vielmehr sollte er die neuen Gedanken kritisch prüfen und - falls sie dieser Prüfung standhalten - tatkräftig unterstützen und entwickeln helfen. Gewiss, die von E. v. Holst geäußerte Sorge ist, was gewisse populäre Darstellungen kybernetischer Ideen anbetrifft, nicht ganz unberechtigt. Aber solche ungerechtfertigten Angriffe auf die Kybernetik, wie wir sie oben andeutungsweise charakterisiert haben, werden heute nicht mehr vorgetragen. Eine Ablehnung der Kybernetik kann heute nicht mehr das Vertrauen der Öffentlichkeit gewinnen.

Ein anderes Problem entsteht dann, wenn versucht wird, Begriffsbildungen und Schlussfolgerungen der Einzelwissenschaften, z. B. der Mathematik, Physik, aber auch der Kybernetik, vom philosophischen Standpunkt aus zu präzisieren.

---

<sup>74</sup>Regelungsvorgänge in der Biologie. Sammelband, zusammengestellt von Dr. H. Mittelstaedt. Verlag R. Oldenbourg, München 1956.



Bei derartigen Versuchen, Begriffe und Aussagen philosophisch exakt zu fassen, muss vorausgesetzt werden, dass die Autoren die elementaren Grundlagen der betreffenden Theorie vollends verstanden haben und dass sie die experimentell festgestellten Tatsachen genau kennen. Solange man über die vorliegenden Gegebenheiten einer Wissenschaft nicht genauestens informiert ist, sollte man vorsichtig urteilen.

Auch bei philosophischen Untersuchungen zu einzelwissenschaftlichen Begriffsbildungen und Theorien ist Sachkenntnis und begriffliche Klarheit geboten. Philosophische Aussagen haben ja nur dann Aussicht, ernst genommen zu werden, wenn es wenigstens plausible Gründe gibt, die den Schluss nahelegen, dass sich gewisse Dinge so und so verhalten. Anderenfalls wird man in solchen philosophischen Überlegungen keinen rechten Sinn erblicken können.

In der Wissenschaft verhält es sich mit der Beweisbarkeit von Aussagen folgendermaßen: Die Wahrheit oder Falschheit einer Aussage wird entweder durch einen strengen logischen Beweis oder durch das wissenschaftliche Experiment entschieden. Solange aber die Wahrheit einer Aussage nicht endgültig entschieden ist, kann man das Für und Wider der Argumente nur vergleichen und gegeneinander abwägen.

Ohne Zweifel bedarf jede Wissenschaft und ganz besonders eine solche wie die Kybernetik einer weitgehenden philosophischen Verallgemeinerung. Die Teilnahme der Philosophen an den weiteren theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Erscheinungen des Automatismus ist nur zu begrüßen. Schlecht ist es jedoch, wenn man anstelle von echten Verallgemeinerungen einseitige Überlegungen über sogenannte "strittige Fragen" als philosophisch bezeichnet, wobei der Streit in einigen Fällen nur darauf beruht, dass die Fragen doppelsinnig formuliert sind.

Denkt eine Maschine? Kann eine Maschine Bewusstsein haben? Ist der Mensch ein Automat? Kann eine Maschine klüger sein als der Mensch?

Das sind einige solcher strittigen Fragen, und da sie immer wieder in den Spalten der Presse und in den Vorlesungsnachschriften der Hörer auftauchen, wollen wir auf sie eingehen.

Die Doppelsinnigkeit der ersten Frage beruht darauf, dass der Begriff "Denken" nicht genau definiert wird. "Einige ziehen es vor, das Wort 'Denken' in bezug auf das, was die Maschine tut, nicht zu gebrauchen", bemerkt hierzu der Mathematiker D. Hagelberger.

"Die Mehrzahl von uns stimmt dem zu, dass die Erfindung der Analysis durch Newton (oder Leibniz) eine höhere Form der geistigen Tätigkeit darstellt als das Erlernen der Analysis durch einen Studenten, aber denkt der Student?" -

Einem Spießer erscheint ein Student, der es gelernt hat, die Ableitung von der Stammfunktion zu unterscheiden, als ein sehr großer Denker, weil er, der Spießer, sich selbst einer solchen intellektuellen Vollkommenheit nicht für fähig hält.

Ein Mathematikprofessor, der seine Leistungen nüchtern beurteilt, wird dagegen sagen, seine eigene bescheidene geistige Arbeit verdiene kaum die hochtrabende Bezeichnung "Denken", wenn man als Denken das bezeichnet, was Euler, Gauß, Leibniz und Newton getan haben, und noch weniger verdiene diese Bezeichnung der Wirrwarr im Kopfe eines Studenten, der geprüft wird.

Wir wollen aber annehmen, der Student könne dennoch denken. Aber denkt ein sechs Monate altes Kleinkind? Wenn nein, in welchem Alter beginnt es denn mit dieser Beschäftigung? Wenn ja, wie kann man das feststellen? Denkt es schon als Embryo?

Wir nehmen gewöhnlich an, dass ein Affe nicht denkt, obwohl er in vielem dem Kleinkind überlegen ist. Es ist durchaus möglich, nur die geistigen Fähigkeiten "Denken" zu nennen, die

sich im Gehirn des Menschen abspielen. Aber dann kann - per definitionem - niemand außer dem Menschen denken.

Andererseits kann man gewisse Tests (Kontrollfragen, die gestellt werden, ohne dass die Lösungsmethoden mitgeteilt werden) ausarbeiten und annehmen, dass ein Objekt, das auf diese Fragen richtige Antworten gibt, denkt. Dann zeigt sich, dass in Abhängigkeit vom Schwierigkeitsgrad der gestellten Aufgaben Affen, Kleinkinder und Studenten nicht denken können.

Ein programmgesteuerter Automat gehört dann ebenfalls in den Kreis der Ausgestoßenen, da er eine Aufgabe ohne einen speziellen Algorithmus nicht lösen kann.

Es ist klar, dass eine Aufgabe von einem Menschen oder Automaten nur dann gelöst werden kann, wenn er die Sprache der Tests beherrscht. Selbst Newton würde nicht verstehen, was man von ihm verlangt, wenn er nicht die Sprache verstünde, in der die Aufgabe formuliert ist.

Noch unbestimmter ist die Frage nach dem "Bewusstsein der Maschinen", da hier die naturwissenschaftliche Frage nach einer Eigenschaft eines Systems, das ein bestimmtes Organisationsniveau besitzt, häufig mit der gesellschaftlich-rechtlichen Frage nach der "Zurechnungsfähigkeit" oder "Verantwortlichkeit für Taten" durcheinandergebracht wird. Es wird gewöhnlich behauptet, dass Automaten kein Bewusstsein haben können, da man sich nicht vorstellen könne, dass Maschinen Bürgerrechte besitzen und zur Verantwortung gezogen werden!

Eine solche Annahme ist tatsächlich höchst unwahrscheinlich, aber das hängt nicht von irgendwelchen Eigenschaften der Automaten ab, sondern von der Art der Organisation der jeweiligen Gesellschaft und welche rechtlichen und moralischen Normen in ihr Gültigkeit haben.

Im alten Ägypten sah man die Katze als heiliges Tier an, und für die Tötung einer Katze wurde man strenger bestraft als für die Ermordung eines Menschen, da man annahm, die Katze sei ein Träger höherer Eigenschaften. In dieser und in anderen Epochen sah man die Menschen nicht als gleich vor dem Gesetz an:

Das Leben eines Sklavenhalters, Feudalherren oder Diktators wurde höher eingeschätzt als das Leben eines Sklaven oder Leibeigenen. Heute gibt es solche Festlegungen nicht mehr, und zwar nicht etwa, weil sich die Natur der Katzen oder der titulierten Personen geändert hat, sondern weil es eine andere Gesellschaftsordnung gibt, in der andere Gesetze gelten.

Pflicht, Moral und Verantwortlichkeit vor dem Gesetz, das sind gesellschaftliche Festlegungen, die im allgemeinen dazu dienen, die Beziehungen zwischen den Menschen, den Gruppen und Klassen zu organisieren und zu steuern. Wenn aber eines Tages Automaten gebaut werden, die die Fähigkeit haben, selbständig Entscheidungen zu treffen, so werden wir vermutlich auch für sie entsprechende Bestrafungen und Ermutigungen suchen und ihre (besondere!) Zurechnungsfähigkeit berücksichtigen müssen. Aber werden sie verstehen, wofür sie bestraft oder belohnt werden?

Das Wort "Bewusstsein" wird zur Bezeichnung verschiedener Tatbestände benutzt. Wir unterstellen dem Wort "Bewusstsein" z. B. eine rechtlich-moralische Bedeutung. wenn wir entscheiden wollen, ob eine Person im Sinne des Gesetzes sich ihrer Handlung, Pflicht oder Verantwortung bewusst bzw. nicht bewusst gewesen ist. Sprechen wir dagegen über das Bewusstsein, das jemand zeitweilig verloren hat und nun nach längerer Ohnmacht wieder erlangt hat, dann verwenden wir dieses Wort im neurophysiologisch-psychologischen Sinne. -

Wieder etwas ganz anderes versteht man unter dem Wort "Bewusstsein", wenn es zur Bezeichnung gewisser intelligenter Fähigkeiten hochentwickelter Tiere benutzt wird.

Verschiedene Bedeutungen hat das Wort vor allem in der Geschichte der Philosophie. Für viele idealistische Philosophen ist das Bewusstsein eine geistige Substanz, die unabhängig von der

Materie wirksam ist.

Für die materialistischen Philosophen ist das Bewusstsein dagegen eine Eigenschaft der Materie. Hier werden also philosophisch zwei ganz verschiedene Tatbestände mit dem gleichen Wort bezeichnet.

Was ist prinzipiell unmöglich für einen Automaten? Schon der englische Mathematiker Turing hat alle möglichen Einwände katalogisiert. Vor einiger Zeit ist gegen die Annahme, die geistigen Funktionen lassen sich unter künstlichen Bedingungen reproduzieren, das Argument vorgebracht worden, die geistigen Funktionen haben sich organisch entwickelt und sind ein Produkt der gesellschaftlichen Entwicklung.

Da künstlich reproduzierte geistige Funktionen diese Eigenschaften nicht hätten, könne man sie also nicht reproduzieren. Eine solche Argumentation ist nicht stichhaltig.

Die Wissenschaftsgeschichte lehrt uns, dass man nicht Unmöglichkeitspostulate aufstellen soll, es sei denn, man kann exakt beweisen, dass etwas nicht möglich ist. Bevor es Wöhler 1824 gelang, Cyan in Oxalsäure überzuführen und 1828 Harnstoff auf künstlichem Wege außerhalb des Tierkörpers darzustellen, glaubten viele an eine besondere Natur der organischen Verbindungen, und der Organismus bediene sich zu ihrer Bildung einer besonderen Kraft, der sogenannten "Lebenskraft". Wöhlers Experimente bewiesen das Gegenteil: Es gibt keinen prinzipiellen Unterschied zwischen anorganischen und organischen Verbindungen.

Seit einigen Jahren sorgt der italienische Arzt Petrucci für Schlagzeilen in den Zeitungen. Es gelang ihm nämlich, menschliches Leben außerhalb des Mutterleibes in einer kleinen Glaskapsel, der sogenannten biologischen Wiege, zu erzeugen.

Diese Beispiele, deren es noch viele andere gibt, sprechen wie im Falle des Bologneser Professors Petrucci gegen religiöse Vorurteile. Die Zeitung des Vatikans, "L'Osservatore Romano" (Römischer Beobachter) verurteilt deshalb auch dieses Experiment als "gotteslästerliches Eingreifen in die göttliche Weltordnung".

Zu keiner Frage gibt es in der wissenschaftlichen Literatur so viele Bücher, so viele gegensätzliche Anschauungen, so viele geniale Gedanken und so viele unbewiesene Behauptungen wie gerade zur Frage nach der Natur des menschlichen Denkapparates.

Wir glauben nun, dass eine systematische und erfolgreiche Untersuchung dieser Fragen wesentlich von zwei Voraussetzungen abhängt, und zwar (1) von der Wahl geeigneter Forschungsmethoden und (2) vom philosophischen Standpunkt, der bewusst oder unbewusst wissenschaftlichen Untersuchungen zugrunde gelegt wird. Über die verschiedenen Forschungsmethoden, die die Kybernetik anwendet, haben wir bereits in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich gesprochen.

Wir wollen jetzt noch einiges zur philosophischen Haltung des Forschers zu den von ihm zu untersuchenden Problemen sagen.

Welche philosophische Denkhaltung soll sich ein Wissenschaftler zu eigen machen, wenn er beispielsweise einen derart komplizierten Mechanismus, wie es der Denkapparat ist, zu erforschen hat?

Soll er im Sinne der Philosophie des Katholizismus annehmen, das Denken sei "keine neue Eigenschaft der Materie ... sondern ... eine Realität für sich ..., eine eigene geistige Wirklichkeit, eine geistige Substanz", die mit naturwissenschaftlichen und mathematischen Methoden nicht erforschbar sei<sup>75</sup> oder soll er im Sinne der materialistischen Philosophie von der Annahme aus-

---

<sup>75</sup>Gott oder ewige Materie. Morus-Verlag. Berlin 1953. Seite 18/14.

gehen, das Denken sei eine Eigenschaft der Materie und ließe sich mit naturwissenschaftlichen und mathematischen Methoden rational erklären?

Die Antwort liegt auf der Hand! Es kommt nur die zuletzt genannte Denkhaltung in Frage.

Das entscheidende Argument für die Richtigkeit dieser Denkhaltung liefert die Wissenschaft durch ihre Ergebnisse selbst. Viele bedeutende Kybernetiker verknüpfen diese philosophische Grundhaltung mit den Ideen der Kybernetik.

Als ein Beispiel für diese Geisteshaltung seien einige Sätze aus einer populärwissenschaftlichen Arbeit des berühmten sowjetischen Mathematikers und Kybernetikers Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow zitiert. Kolmogorow sagt:

"Die häufig anzutreffende Ablehnung dieser Ideen (der Kybernetik H. K.) bzw. die Abneigung ihnen gegenüber erklärt sich daraus, dass man nicht anerkennen möchte, dass der Mensch, der zwar tatsächlich ein kompliziertes materielles System darstellt, doch ein System von begrenzter Kompliziertheit und äußerst beschränkter Vollkommenheit ist und daher imitiert werden kann. Dieser Umstand wird von manchen als erniedrigend und schrecklich empfunden. Selbst Leute, die diese Idee sich zu eigen gemacht haben, finden sich schwer mit dem Gedanken ab, dass man vollständig in die Geheimnisse des Menschen eindringen kann, ja dass dies sogar soweit gehen könnte, den Menschen gewissermaßen zu kodieren und an einen anderen Ort telegraphisch weiterzuleiten.

Diese Möglichkeit erscheint ihnen abstoßend und erschreckend. Ich sehe in dem Bestreben, sich vollständig zu erfassen, nichts Erniedrigendes und Schreckliches. Derartige Stimmungen können nur aus Halbwissen entstehen."<sup>76</sup>

Die Denkhaltung, dass wir prinzipiell jedes Objekt erforschen und evtl. sogar reproduzieren können, besitzt in den materialistischen Philosophen von der griechischen Antike bis zur Gegenwart eine jahrtausendalte Tradition und deckt sich vollständig mit der von Marx, Engels und Lenin begründeten wissenschaftlichen Weltanschauung.

Bemerkenswert ist, dass viele bürgerliche Kybernetiker auf materialistischen Positionen stehen und zu verschiedenen Problemen der Kybernetik Ansichten vertreten, die teilweise oder sogar vollständig mit den Anschauungen des dialektischen Materialismus übereinstimmen. Trotz dieser (wenigstens teilweisen) Übereinstimmung der Ansichten bekennen sich viele bürgerliche Kybernetiker nicht zur Philosophie des dialektischen Materialismus.

Einer der Gründe hierfür dürfte darin zusehen sein, dass diese Kybernetiker sich gegenüber weltanschaulichen Fragen und Konsequenzen, die sich teilweise unmittelbar aus den Ergebnissen ihrer eigenen Forschungsarbeit folgern lassen, neutral bleiben wollen.

Es wird manchmal gefragt: "Ist der Mensch ein Automat?" Um diese Frage beantworten zu können, muss man zunächst prüfen, was wir unter dem Wort "Automat" verstehen wollen.

In Meyers Großem Konversationslexikon, das um die Jahrhundertwende (1903) erschien, versteht man unter einem Automaten im engeren Sinne eine mechanische Vorrichtung, "welche die Tätigkeit eines Menschen (Android) oder Tieres nachahmt." Im weiteren Sinne wird darunter "jede durch verborgene Kraftmittel (Federn, Gewichte, Elektromagnetismus) in Bewegung gesetzte Vorrichtung (Uhren, Planetarien)" verstanden.

In dem Buch Automaten von S. Schaumjan (1952) wird unter einem Automaten eine von einem Arbeiter kontrollierte Arbeitsmaschine verstanden, die in regelmäßiger Folge Arbeits-

---

<sup>76</sup>A. Kolmogorow: Automaten und Leben. In: "Sowjetwissenschaft". Gesellschaftswissenschaftliche Beiträge. Heft 11/1964, Seite 1166

und Leergänge ausführt.

Die erste Definition bezeichnet die primitiven Automaten, die zum Beispiel von Jaques de Vaucanson (1709-1792), Pierre Jacquet Duoz (1721-1790) konstruiert wurden.

Diese hervorragenden Mechaniker bauten zur Erheiterung der Aristokraten wundervolle Puppen und benutzten dabei als erste in der Technik die Möglichkeiten der Programmsteuerung. Die Statuen im Park von Fontainebleau drohten den Spaziergängern mit dem Finger und überschütteten sie mit Wasser. Auf den Jahrmärkten zeigte man damals eine schreibende Knabepuppe und eine eiserne Ente, die bald schnatterte, bald von einem Fuß auf den anderen trat.

Die zweite Definition bezeichnet die Arbeitsautomaten unserer Tage, z. B. die Abfüll- oder Verpackungsautomaten oder die Werkzeugmaschine, die selbständig etwa Zylinderblöcke bearbeitet.

In diesem Buch wollen wir unter einem Automaten ein physikalisch offenes System verstehen, das durch Signale, die es selbst erzeugt, zweckmäßig gesteuert wird. Diese Definition lässt die Technik der Zukunft bereits ahnen.

Die Bedeutung der Wörter ist veränderlich. Wir können auch auf einer sehr hohen Abstraktionsstufe den Menschen als "Automat" auffassen, aber dann muss der ursprüngliche Begriff des Automaten verallgemeinert werden. Wir sehen also, dass man durchaus verschiedene Bedeutungen des Wortes "Automat" im Auge haben kann. Es ist demnach unter gewissen Voraussetzungen legitim zu fragen: Ist der Mensch ein Automat? In genau der gleichen Lage befinden wir uns, wenn wir versuchen zu klären, ob der Mensch ein Tier sei oder nicht.

Der französische Schriftsteller Vercors beschreibt in seinem Roman *Les animaux dénaturés* Wesen, die halb Mensch und halb Affe sind.<sup>77</sup> Der Biologie und der Psychologie widerspricht eine solche Annahme nicht. Über diese Wesen und die Beziehungen der Menschen zu ihnen konnte der Schriftsteller viele schöne Paradoxa anführen, aber die Frage, wie man sich zu ihnen verhalten sollte, beantwortete er letzten Endes nicht. Die Frage wurde eigens in einer unentscheidbaren Form gestellt.

Der Gedanke, dass es Wesen gibt oder gegeben hat, die halb Mensch und halb Tier sind, ist - wenn man an den Stammbaum des Menschen denkt - durchaus begreiflich. Dass es aber auch Wesen geben könnte, die halb Mensch und halb Maschine sind, wird dagegen für unverständlich und phantastisch gehalten. Mit solchen Wesen haben sich bereits schon vor Jahren Schriftsteller vertraut gemacht.

Im Jahre 1871 schrieb der englische Schriftsteller Samuel Butler die sehr interessante und erregende Satire *Erewhon*, deren ursprünglicher Titel *Darwin unter den Maschinen* lautet. In diesem Buch wird eine Welt beschrieben, in der sich die Maschinen von niederen Formen zu höheren entwickeln. Diese Entwicklung vollzieht sich nach denselben Gesetzen, die nach Darwin auch für die Lebewesen gelten. Butler untersucht in seinem Buch die Klassifikation der Maschinen in Gattungen und Arten, ihre Lebensgewohnheiten und das Problem des freien Willens.

Der berühmte amerikanische Mathematiker und Begründer der mathematischen Theorie der Nachrichtenübertragung Claude E. Shannon bemerkt zu diesem Buch:

"Wenn man *Erewhon* heutzutage liest, findet man 'das Buch der Maschinen' aufregend prophetisch. Derzeitige und künftige Rechenmaschinen und Kontrollsysteme nehmen in der Tat

---

<sup>77</sup>Die deutsche Übersetzung erschien unter dem Titel 'Das Geheimnis der Tropis' im Aufbau-Verlag. Berlin 1958.

mehr und mehr die Fähigkeiten und Funktionen von Tieren und Menschen an, in größerem Ausmaß sogar als sich Butler vorgestellt hatte."<sup>78</sup>

In der Tat, die modernen Maschinen realisieren Eigenschaften, die wir bisher nur dem Menschen zugeschrieben haben. Sie sammeln Informationen, verarbeiten sie, speichern sie über lange Zeiträume und geben sie nach Bedarf wieder ab. Aber damit noch nicht genug. Diese Maschinen können sogar lernen, Gedichte machen und auch über Witze lachen.

Sollte Butler recht behalten? Wird es eines Tages Maschinen geben, die sich aus der Vormundschaft des Menschen befreien und sich gegen ihren eigenen Schöpfer wenden? Wir meinen, dass dies nicht der Fall sein wird. Die Gründe, die dieses Urteil stützen, haben wir bereits in den vorangehenden Kapiteln erörtert.

Ergänzend wollen wir noch sagen, dass wir in dem Vergleich des Menschen mit den Maschinen verschiedenen Typs, die wir weiter oben eingehender besprochen haben, weder etwas moralisch Anrühiges noch etwas wissenschaftlich Fruchtloses sehen. Im Gegenteil!

In diesem Vergleich liegt genau so wenig moralisch Anrühiges oder wissenschaftlich Bedeutungsloses wie im Vergleich des Menschen mit dem Tier, speziell dem Affen, der dem Menschen - entwicklungsgeschichtlich gesehen - am nächsten steht. Dem Biologen, Zoologen, Physiologen und Psychologen geben diese Vergleiche bedeutsame Aufschlüsse über Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Mensch und Tier.

Ebenso liefert der Vergleich der Strukturen und Funktionen des menschlichen Gehirns mit denen der heutigen Rechenmaschinen sowohl dem Naturwissenschaftler als auch dem Gesellschaftswissenschaftler wesentliche Erkenntnisse über die im Gehirn bzw. in der Maschine ablaufenden physikalischen und biochemischen Gesetzmäßigkeiten. Wir teilen K. Steinbuchs Erwartung, "dass mit den Erfahrungen an technischen Systemen viele Eigenschaften organischer Systeme, insbesondere des menschlichen Denkapparates, erklärt werden können."<sup>79</sup>

Aber diese methodische und letztlich weltanschauliche Einstellung zu diesen Sachverhalten verlangt zugleich Vorsicht bei Äußerungen über die Anwendungsmöglichkeiten lernender Automaten. Diese Zurückhaltung, die wir glauben fordern zu müssen, bedeutet nicht, dass man nicht alle wissenschaftlichen, sozialen und politischen Konsequenzen durchdenken und zur Diskussion stellen soll, die sich aus dem Einsatz solcher informationsverarbeitenden und lernenden Maschinen in der Forschung, Industrie, wirtschaftlichen und militärischen Planung und Strategie ergeben.

Besonders der Philosoph trägt hier durch sein Wissen über die Geschichte der Philosophie und die Wissenschaften und über die Beziehungen von Ideologie und gesellschaftlichen Verhältnissen eine hohe Verantwortung. Eine grundlegende Erkenntnis der marxistischen Philosophie besagt, dass es falsch sei, biologische oder technische Verhältnisse zum Ausgangspunkt für die Beurteilung gesellschaftlicher Zusammenhänge zu nehmen.

Denn ein solcher Ausgangspunkt führe in der Regel zu einer falschen Darstellung. Als Beispiele für eine aus biologischer Sicht vollkommen verzerrte Darstellung gesellschaftlicher Verhältnisse seien die reaktionäre Rassenideologie und der soziale Darwinismus genannt. Die Theoretiker dieser Auffassungen behaupteten, dass die Gleichheit der Menschen etwas Naturwidriges sei. Die Menschen spalteten sich vielmehr in höhere und niedrigere Rassen, zwischen denen ein Dauerkampf auf Leben und Tod geführt werde. In diesem Kampf habe nur der Stärkere das Recht auf Leben, und dieser Stärkere, so glaubten die faschistischen Rassenfanatiker, sei die germa-

---

<sup>78</sup>Claude E. Shannon: Rechenmaschinen und Automaten. In: "Methodos" Bd. VI, 1954. Seite 115 (engl.).

<sup>79</sup>K. Steinbuch: Automat und Mensch. Springer-Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.

nische Rasse. Rassentheorie und Sozialdarwinismus sind unwissenschaftlich und im höchsten Grade reaktionär.

Ebenso unwissenschaftlich ist es auch, die menschlichen Beziehungen aus der Sicht der heute existierenden lernenden Automaten zu betrachten oder biologische Gesetzmäßigkeiten in die Welt der Automaten zu projizieren. Für die Welt der Automaten, der Tiere und Menschen gelten qualitativ verschiedene Gesetzmäßigkeiten, die offensichtlich nicht aufeinander reduzierbar sind.

Das besagt wiederum nicht, dass es zwischen den Objekten dieser drei verschiedenen Bereiche in bestimmter Hinsicht nicht strukturelle oder funktionale Ähnlichkeiten gibt.

Wir wollen hier noch kurz auf die in einigen kybernetischen Beiträgen diskutierten Fragen eingehen, ob Maschinen klüger sein können als Menschen. Einige Autoren setzen das Wort "klug", wenn sie es als Attribut für das Wort "Maschine" verwenden, vorsichtshalber in Anführungsstriche, um dadurch anzudeuten, dass sie das Prädikat "klug" den Maschinen eigentlich nicht zuerkennen wollen.

Andere Autoren dagegen setzen das Wort nicht in Anführungsstriche. Sie sind überzeugt, dass Maschinen diese Eigenschaft durchaus zukommt. In diesem Zusammenhang verweisen sie zumeist auf die lernenden Automaten.

Ob Maschinen nun klug sind oder nicht, können wir nicht entscheiden, weil es keine allgemein anerkannte Definition der Bedeutung des Wortes "klug" gibt. Im Grunde handelt es sich hierbei um eine ähnliche Problematik wie bei der Frage, ob Maschinen denken und lernen können.

Auch für diese Begriffe gibt es heute noch keine allgemein anerkannte Definitionen. Außerdem ist unser Wissen über das Denken und Lernen noch sehr begrenzt. Manchmal kommt man der Klärung einer Frage einen Schritt näher, wenn man an die Stelle des bekannten, aber nicht exakt definierten Begriffs einen neuen und exakt definierten Begriff einführt.

Beispielsweise wissen wir heute sehr genau, welche Prozesse sich in den informationsverarbeitenden Maschinen abspielen. Aber wir wissen nicht genau, welche Prozesse sich im einzelnen im Gehirn abspielen. Wir können also nicht mit Sicherheit sagen, die im Gehirn und in der Maschine vor sich gehenden Prozesse sind die gleichen. Daher können wir auch nicht sagen, dass das Wort "denken" die gleichen Prozesse bezeichnet.

Dagegen könnte man nun folgendes einwenden: Gehirn und Maschine liefern aber die gleichen Resultate. Ist es dann nicht naheliegend, zu vermuten, dass sich im Gehirn und in der Maschine die gleichen Prozesse abspielen? Natürlich besteht eine solche Vermutung zu Recht. Nur sollte man nicht so tun, als sei durch diese Tatsache schon erwiesen, dass sich in beiden Systemen die gleichen Prozesse abspielen und dass es daher vollkommen unbedenklich sei, vom Denken der Maschine zu sprechen.

Wir halten es übrigens nicht für korrekt, von den gleichen Resultaten auf die gleichen Prozesse zu schließen.<sup>80</sup>

Um Missverständnisse zu vermeiden, möchten wir ausdrücklich betonen, dass wir nicht der Meinung sind, Maschinen können prinzipiell nicht denken. Wir sind sogar davon überzeugt, dass eine materialistische Weltanschauung den Gedanken der künstlichen Herstellung denkender Systeme geradezu nahelegt.

Kehren wir aber zurück zu unserer ursprünglich gestellten Frage: Können Maschinen klüger sein als Menschen?

---

<sup>80</sup>G. Klaus: *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Berlin 1964, Seite 172

Der bekannte westdeutsche Kybernetiker K. Steinbuch sagt dazu: "Der Automat kann ebenso wie der Mensch nur das lernen, was mit seinen Bauelementen und seiner Struktur physikalisch möglich ist. Wenn also z. B. die Anzahl der verfügbaren Bauelemente oder Speicherzellen usw. zu gering ist oder die geeigneten Wandler zur Beobachtung der Außenwelt fehlen, ist seine Lernfähigkeit zweifellos beschränkt.

Entfallen diese trivialen Beschränkungen, ist kein Grund einzusehen, weshalb die Automaten ausgerechnet auf das intellektuelle Niveau des Menschen beschränkt bleiben sollten. Der Automat wird zum 'Intelligenzverstärker'. Diese Intelligenzverstärker sollen die geistigen Kräfte des Menschen vervielfachen, so wie die körperlichen Kräfte durch die Kraftmaschinen vervielfacht werden."<sup>81</sup>

Es wird Maschinen geben, die Operationen ausführen werden, die das menschliche Nervensystem nicht mehr leistet. Denn wir können eine Rechenmaschine oder eine logische Maschine immer noch verbessern, aber in unser Gehirn können wir beispielsweise keine leistungsfähigeren Nerven einbauen, die etwa die Funktionsarbeiten von 0,001 Mikrosekunden der neuesten elektronischen Schaltelemente aufweisen. Die Menschen werden selbst dafür sorgen, dass solche Maschinen produziert werden.

Schließlich werden wir immer die Maschinen für wünschenswert halten, die ihren Zweck, ein brauchbarer Intelligenzverstärker des Menschen zu sein, besser erfüllen als andere, die diesen Zweck weniger erfolgreich garantieren. Aber wir brauchen deswegen nicht in Sorge und Angst vor unseren eigenen Schöpfungen zu verfallen.

Wir verfügen heute über gewaltige Naturkräfte, die wir im guten und im schlechten Sinne anwenden können. Aber in welchem Sinne wir sie anwenden, liegt ganz in unserer Macht.

Korrekt gesagt, zu welchem Zweck die wissenschaftlichen Erkenntnisse benutzt werden, hängt in erster Linie von den gesellschaftlichen Verhältnissen ab, in denen der Mensch lebt. Die Maschine verhält sich gegenüber dem Menschen und den herrschenden gesellschaftlichen Kräften neutral. Sie dient jedem, der sie in Gang setzt. Ein Rechenautomat kann also auf Grund einer Marktanalyse die Einschränkung der Produktion und die Entlassung von Arbeitern empfehlen, sie kann aber ebensogut die Erweiterung der Produktion und die Einstellung neuer Arbeitskräfte vorschlagen.

Was der Rechenautomat im einzelnen auch sagt, seine Antwort hängt in jedem Falle - vorausgesetzt, er macht keine Fehler - von dem Gegenstandsbereich ab, dem die Informationen entnommen sind. Als unbestechlicher Zeuge gibt er dann, ohne Rücksicht auf die ihn befragenden Menschen zu nehmen, Auskunft über das, was er auf Grund der ihm eingegebenen Daten berechnen bzw. logisch erschließen konnte.

Wenn - wie berichtet wird - im November 1960 Arbeiter der Renault-Automobilwerke in Boulogne-Billancourt eine Rechenmaschine zerschlagen haben, weil sie der Werkleitung empfahl, auf Grund von Absatzschwierigkeiten Arbeiter zu entlassen, so kann man diese Handlung, obwohl sie menschlich durchaus begreiflich ist, nicht vernünftig finden.

Nicht die Maschine ist schuld, sondern die gesellschaftlichen Verhältnisse in einem kapitalistischen Land sind verantwortlich, dass Arbeiter über Nacht ihren Arbeitsplatz verlieren können und ihre Familien Not leiden müssen. Durch die Zerstörung kostspieliger Maschinen wird das politische und soziale Problem, um das es hier eigentlich geht, nicht gelöst.

Die Werkleitung wäre nämlich früher oder später zu derselben Entscheidung gekommen. Besser wäre es, die Maschine zu anderen Aufgabenstellungen heranzuziehen, z. B. zu der, wie man

---

<sup>81</sup>K. Steinbuch: Künstliche Intelligenz in "Studium generale" Heft 7; 1961, Seite 407



durch gezielte Maßnahmen den Arbeitern den Arbeitsplatz erhalten kann. Aber diese Aufgabe gehört im Prinzip nicht zu den Interessen der kapitalistischen Arbeitgeber.

In den kapitalistischen Industrieländern werden in den Reihen der Gewerkschaften und von namhaften bürgerlichen Wissenschaftlern öffentlich ernsthafte Befürchtungen über die sozialen Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes von Automaten zum Ausdruck gebracht.

Wir wollen hier nur zwei kritische Stimmen wiedergeben. Der in diesem Buch wiederholt genannte amerikanische Mathematiker und Begründer der Kybernetik Norbert Wiener meint zu diesem Problem:

"Vielleicht ist es für die Menschheit gut, dass sie durch die Maschine davon entbunden wird, niedrige und unangenehme Arbeiten auszuführen; vielleicht ist es auch nicht gut. Ich weiß es nicht. Es kann nicht gut sein, wenn diese neuen Möglichkeiten in Begriffen des Marktes, des Geldes, das dabei eingespart wird, bewertet werden ..."<sup>82</sup>

Der Sekretär für internationale Angelegenheiten bei der amerikanischen Gewerkschaftszentrale AFL-CIO, G. P. Delany, beurteilt die Sachlage noch schärfer als Wiener. Er sagt:

"Die neue Technik kann den Menschen von Routine und Einförmigkeit der Arbeit, aber auch von seinem Arbeitsverhältnis und seinem Einkommen befreien. Sie kann sein Lebensniveau bedeutend erhöhen, allgemeinen Wohlstand schaffen, kann aber auch die Ursache für ständig wachsende Überproduktion sein, die nicht ausgenutzt werden kann, weil die Konsumenten nicht über die erforderliche Kaufkraft verfügen. Es ist heute unmöglich zu sagen, ob die Automatisierung Ursache von Wohlstand oder Elend sein wird."<sup>83</sup>

Diese Äußerungen lassen deutlich erkennen, dass die sozialen Folgen der Automation für die kapitalistische Gesellschaft zu einem ernststen Problem geworden sind. Die Einrichtung automatischer Taktstraßen und automatischer Fabriken bringt große wirtschaftliche Vorteile: die Produktionskapazität steigt, die Arbeitsproduktivität erhöht sich um ein Mehrfaches, die Waren werden billiger, und die Gewinne werden größer.

Für den Unternehmer ist die Automation offensichtlich eine Quelle neuen Reichtums. Weniger für den Arbeiter. Er verliert seinen Arbeitsplatz und seinen Verdienst, wenn er durch Automaten ersetzt wird. Wenn in dem betreffenden Land gerade keine Konjunktur herrscht, findet er nur noch sehr schwer neue Arbeit

In vielen Fällen bleibt er arbeitslos. Aber selbst wenn er in einem anderen Beruf Arbeit findet, muss er zunächst oder für immer als Ungelernter arbeiten, und in den meisten Fällen verdient ein Ungelernter weniger als ein Facharbeiter. Ein geringerer Verdienst bedeutet aber auch geringeren Anteil an dem von ihm mitgeschaffenen gesellschaftlichen Reichtum.

Für die profitmotivierte Wirtschaft des Kapitalismus gibt es noch ein weiteres ernstes Problem: die Überproduktion. Die kapitalistische Wirtschaft vermag Waren in stets größerem Umfange zu produzieren. Im Kapitalismus wird nun ein Teil des Wertes der Ware in Form von Löhnen an die Arbeiter gezahlt.

Der andere Teil ist Privatprofit, der zum Teil neu investiert wird. Jener Profit, der nicht investiert wurde, steht den Aktionären zum Kauf von Konsumgütern zur Verfügung. Die Summe der Löhne, Gehälter und eines Teiles des Profits ist aber kleiner als der Gesamtwert der produzierten Waren. Mit anderen Worten: die erzeugten Waren können nicht alle gekauft werden,

---

<sup>82</sup>N. Wiener: *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine*. Düsseldorf/Wien 1963.

<sup>83</sup>G. P. Delany: *Conférence Internationale du Travail*, 39e session, Genève 1956. *Compte Rendu Provisoire*, Nr.24, Seite 894.

weil eine ausreichende Kaufkraft fehlt.

Das wirtschaftliche System des Kapitalismus ist instabil. In mehr oder weniger regelmäßigen Abständen erfassen Krisen unterschiedlicher Intensität und Dauer, die durch systemimmanente Ursachen erzeugt werden, die Wirtschaft einzelner oder mehrerer kapitalistischer Länder. Angesichts der wachsenden politischen, wirtschaftlichen und militärischen Macht der sozialistischen Staaten greift der bürgerliche Staat immer mehr in die wirtschaftliche Entwicklung ein mit dem Ziel, die Stabilität seiner Ökonomie zu sichern.

Mathematiker und Ökonomen werden beauftragt, die volkswirtschaftlichen Zusammenhänge zu untersuchen. Bisher waren aber alle entwickelten Modellkonstruktionen der kapitalistischen Wirtschaft derart vereinfacht, dass auf ihrer Grundlage keine gesicherten Aussagen gemacht werden konnten.

Welche Ergebnisse diese Untersuchungen auch zeitigen mögen, sie werden das Grundübel des Kapitalismus, den Widerspruch der gesellschaftlichen Produktion und der privaten Aneignung, nicht beseitigen. Wenn dieser Widerspruch gelöst werden soll, dann muss man die kapitalistischen Produktionsverhältnisse in sozialistische überführen.

Die sich durch die Automation ergebenden wirtschaftlichen und sozialen Probleme werden in sozialistischen Ländern auf der Grundlage wesentlich anderer wirtschaftlicher und politischer Verhältnisse in Angriff genommen. Hier befinden sich nämlich die Produktionsmittel (die Maschinen, Transportmittel, Bodenschätze, Gewässer, der Boden u. a.) nicht in den Händen einiger weniger, sondern in den Händen des Staates oder der Genossenschaften.

Die auf diese beiden Formen des Eigentums sich begründenden sozialistischen Produktionsverhältnisse ermöglichen es nun, die Produktion nach gesamtgesellschaftlichen Bedürfnissen zu planen und zu organisieren.

Diese gesellschaftlichen Grundlagen machen es im Prinzip unmöglich, dass dem Arbeiter durch die Automaten Arbeit und Verdienst genommen werden. Durch die Beseitigung des Bildungsprivilegs und durch die großzügige Förderung von Wissenschaft und Technik steht heute der sozialistischen Industrie eine verhältnismäßig größere Anzahl von Wissenschaftlern und Technikern zur Verfügung als in den meisten kapitalistischen Staaten.

Daher bestehen auch in den sozialistischen Ländern im allgemeinen günstige Voraussetzungen für die Automation. Es soll hier natürlich nicht übersehen werden, dass die Automation auch in einem sozialistischen Land wirtschaftliche Umstrukturierungen, menschliche Probleme und Konflikte mit sich bringt.

Beispielsweise werden Arbeiter oder Angestellte durch die Einführung von Taktstraßen und von datenverarbeitenden Büromaschinen ersetzt. Sie müssen, falls sie in dem bisherigen Betrieb nicht weiter beschäftigt werden können, entsprechend ihrer Qualifikation in andere Betriebe umgesetzt werden.

Das kann bedeuten, dass derjenige, der einen neuen Arbeitsplatz zugewiesen bekommt, seinen Wohnort wechseln muss. Vielleicht muss er auch in einem anderen Beruf arbeiten, muss sich also erst die erforderlichen Kenntnisse aneignen. Für ältere Menschen, die schon Jahrzehnte in ihrem Beruf tätig sind, ist diese Änderung gewiss nicht leicht.

Aber diese Sorgen sind gering, verglichen mit denen um den Arbeitsplatz in einem kapitalistischen Land. Im Sozialismus ist ein neuer Arbeitsplatz gesichert. In kapitalistischen Ländern hat der Verlust des Arbeitsplatzes nur zu oft Arbeitslosigkeit zur Folge.

Uns sollte jede Furcht vor der die geistigen Kräfte des Menschen vervielfachenden Maschine ebenso fremd sein wie gedankenloser Optimismus. Gewiss, es ist denkbar, dass ein hochentwi-

ckelter Automat dem Menschen gefährlich werden könnte, aber dann nicht aus eigenem bösen Willen, sondern durch den bösen Willen seines Schöpfers.

Wir sollten stets daran denken, dass es bei uns liegt, welche Maschinen wir haben wollen, und wir wollen Maschinen haben, die zu unserem Nutzen arbeiten und das tun, was wir von ihnen verlangen. Wissenschaft und Technik und alle Dinge, die wir geschaffen haben, sind dazu bestimmt, dem menschlichen Leben zu dienen und uns alle zusammen und jeden einzelnen glücklich zu machen.

Daher stellt sich die Welt der in den Dienst des Kommunismus gestellten Automaten dem unvoreingenommenen Blick als eine gute Welt dar, in der der Wille und das Wort des Menschen eine Kraft erhalten, mit der unsere Ahnen nicht einmal die mächtigen Zauberer ausgestattet hatten.

## 18 Literatur

Für ein vertieftes Studium der Fragen, die in diesem Buch berührt werden, sollen im folgenden zu den einzelnen Kapiteln spezielle Hinweise gegeben werden.

Für einen allgemeinen Überblick empfehlen wir folgende Bücher:

W. R. ASHBY: An Introduction to Cybernetics. Chapman & Hall, London 1956. (Eine Einführung in die Kybernetik.)

W. R. ASHBY: Design for a Brain. Chapman & Hall, London 1960. (Entwurf für ein Gehirn.)

G. KLAUS: Kybernetik in philosophischer Sicht. Dietz Verlag, Berlin 1962.

G. KLAUS: Kybernetik und Gesellschaft. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1962.

N. KOBRINSKI, W. PEKELIS: Schneller als der Gedanke. Verlag Neues Leben, Berlin 1961.

I. A. POLETAJEV: Kybernetik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1962.

K. STEINBUCH: Automat und Mensch. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.

N. WIENER: Kybernetik - Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine. Econ Verlag, Düsseldorf/Wien 1963.

N. WIENER: Mensch und Menschmaschine. Metzner-Verlag, Frankfurt a. M./Berlin 1952.

Sammelband: Kybernetik und Praxis. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1963.

Sammelband: Mathematische und physikalisch.technische Probleme der Kybernetik. Akademie-Verlag, Berlin 1963.

Sammelband: Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.

### Literatur zum Kapitel 2

G. KLAUS: Kybernetik in philosophischer Sicht. Dietz Verlag, Berlin 1962, Seite 290 bis 324.

A. N. ROSENBLUETH, N. WIENER, J. BIGELOW: Behavior, Purpose and Teleology. In "Philosophy of Science", Heft 10/1943, Seite 18 bis 24. (Verhalten, Zielstrebigkeit und Teleologie.)

W. MACKE: Thermodynamik und Statistik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1963.

A. SOMMERFELD: Thermodynamik und Statistik. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. V.) Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1962.

L. BRILLOUIN: Science and information theory. Academic Press Inc., New York 1956, Chapter 13. (Wissenschaft und Informationstheorie.)

B. W. GNEDENKO, A. H. CHINTCHIN: Elementare Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1964.

B. W. GNEDENKO. Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Akademie-Verlag, Berlin 1962.

A. M. JAGLOM, I. M. JAGLOM: Wahrscheinlichkeit und Information. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960.

### Literatur zum Kapitel 3

TH. FROMME: Modelle zur Nachahmung elementarer tierischer Reaktionen. In "Regelungsvorgänge in der Biologie". Oldenbourg-Verlag, München 1956.

#### **Literatur zum Kapitel 4**

T. BECK: Streifzug durch die Geschichte des Maschinenbaus. 1933

G. DIRLS: Technik der Antike. 1933

Sammelband: Handbuch der Automatisierungstechnik. Verlag für Radio-Foto-Kino-Technik, Berlin-Borsigwalde 1959.

G. SCHAUMJAN: Automaten. Moskau 1952

W. I. DOMANSKI: Einführung in die Automation und Telemechanik. 1930

#### **Literatur zum Kapitel 5**

V. FERNER: Anschauliche Regelungstechnik. Verlag Technik, Berlin 1960.

E. POPOW: Dynamik automatischer Regelungssysteme. Akademie-Verlag, Berlin 1958.

M. SCHÜLER: Einführung in die Theorie der selbsttätigen Regler. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1956.

A. TASTIN: Rückkopplungen. Sammelband: "Automatische Regulierung". Moskau 1960

A.A.FELDBAUM: Rechenggeräte in automatischen Systemen. Oldenbourg-Verlag, München 1962.

J. J. GILLE, M. PELEGRIN, P. DECAULNE: Lehrgang der Regelungstechnik. Verlag Technik, Band I, Berlin 1960.

E. P. POPOW, I. P. PALTOW: Näherungsmethoden zur Untersuchung nichtlinearer Regelungssysteme. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1963.

W. W. SOLODOWNIKOW: Grundlagen der selbsttätigen Regelung. Verlag Technik, Berlin, Teil I 1958; Teil II 1959.

Sammelband: Regelungstechnik. Oldenbourg-Verlag, München 1957:

HSUE SHEN TSIEN: Technische Kybernetik. Verlag Technik, Berlin 1958.

A. G. IWACHNENKO: Technische Kybernetik. Verlag Technik, Berlin 1964.

W. KASAKEWITSCH: Extremal geregelte Systeme. Sammelband: "Automatische Steuerung und Rechentechnik. Moskau 1958

#### **Literatur zum Kapitel 6**

A. M. JAGLOM, I. M. JAGLOM: Wahrscheinlichkeit und Information. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960.

H. ZEMANEK: Elementare Informationstheorie. Oldenbourg-Verlag, München 1959.

L. BRILLOUIN: Science and Information Theory (Wissenschaft und Informationstheorie). In "Academic Press" Inc., New York 1956.

A. A. CHARKEWITSCH: Über den Wert einer Information in "Probleme der Kybernetik", Band 4, Akademie-Verlag, Berlin 1964.

A. A. CHARKEWITSCH: Grundzüge der allgemeinen Theorie der Nachrichtenübertragung.

A. FEINSTEIN: Foundations of information theory. McGraw Hill Book Comp., 1958. (Grundlagen der Informationstheorie.)

W. MEYER-EPPLER: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959.

P. NEIDHARDT: Einführung in die Informationstheorie. Verlag Technik, Berlin 1957.

Sammelbände: Arbeiten zur Informationstheorie. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften,

Berlin, Band I 1957, Band H 1958, Band III 1960, Band IV 1963, Band V 1963.

### **Literatur zum Kapitel 7**

- S. C. KLEENE: Introduction to Metamathematics. North-Holland Publ. Co. 1952. (Einführung in die Metamathematik.)
- R. PETER: Rekursive Funktionen. Akademie-Verlag, Berlin 1957.
- C. E. SHANNON: A universal Turing-machine with two internal states in "Automata Studies", Annals of Mathematics Studies 34, Princeton 1956; (Eine universelle Turing-Maschine mit zwei inneren Zuständen.)
- H. THIELE: "Klassische" und "moderne" Algorithmenbegriffe in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik", Akademie-Verlag, Berlin 1963.
- B. A. TRACHTENBROT: Wieso können Automaten rechnen? VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1961.
- N. P. BUSLENKO, J. A. SCHREIDER: Die Monte-Carlo-Methode und ihre Verwirklichung mit elektronischen Digitalrechnern. B. G. Teubner-Verlag, Leipzig 1964.
- W. KLEBER: Kristallchemie. B. G. Teubner-Verlag, Leipzig 1963.
- K. TH. WILKE: Methoden der Kristallzüchtung. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1963.
- E. A. ANDERER, D. HANDSCHUH: Die Reihenfolge der Aminosäuren im Protein des Tabakmosaikvirus. In "Zeitschrift für Naturforschung", Heft 17 b/1962, Seite 356.
- F. H. CRICK, D. WATSON: Genetical implications of the structure of deoxyribonucleic acid. (Die genetische Funktion der Struktur von Desoxyribonukleinsäure) in "Nature", 171/1953, page 964.
- H. FRIEDRICH-FREKSA: Genetik und biochemische Genetik in "Naturwissenschaften", Heft 48/ 1961, Seite 10.
- W. GAMOW: Possible relations between deoxyribonucleic acid and protein structures (Mögliche Beziehungen zwischen der Desoxyribonukleinsäure und Eiweißstrukturen) in "Nature", 173/1954, page 818.
- G. GRÜMMER: Informationstheorie und Biochemie und
- E. GÜNTHER: Informationstheorie und Genetik. Sammelband: "Einige Beiträge zu Fragen der Kybernetik". Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1963.
- G. SCHRAMM: Biochemische Grundlagen des Lebens. In "Naturwissenschaftliche Rundschau", Heft 16/1963, Seite 89.
- F. SORM: Die Proteine, ihre Struktur und Funktion. In "Die Pharmazie", Heft 17/1962, Seite 257.
- P. STARLINGER: Die genetische Regulation der Enzymsynthese. In "Angewandte Chemie", Heft 75/1963, Seite 71.
- H. G. WITTMANN: Übertragung der genetischen Information. In "Naturwissenschaften", Heft 50/1963, Seite 76.
- I. I. SCHMALHAUSEN: Grundlagen des Evolutionsprozesses vom kybernetischen Standpunkt. In "Probleme der Kybernetik". Bd. 4, Akademie-Verlag, Berlin 1964.

### **Literatur zum Kapitel 8**

- L. KALMAR. Über eine Variante des Neumannschen selbstreproduzierenden Automaten. In: "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik" . Akademie-Verlag.

Berlin 1963.

J. C. KEMENY: Man viewed as a machine. In "Scientific American", 192/1955, page 58. (Der Mensch als Maschine betrachtet.)

J. VON NEUMANN: The general and logical theory of Automata. In "The Hixon Symposium on Cerebral Mechanisms in Behaviour", New York, 1957.

### **Literatur zum Kapitel 9**

G. BELIZKI: Die Ionenmechanismen der wichtigsten Nervenprozesse. 1958

J. C. ECCLES: The physiology of nerve cells. (Die Physiologie der Nervenzellen.) Hopkins Press, Baltimore 1957.

W. ERSTHAUSEN: Der Einfluss der Impulsdaten auf die Impulsverarbeitung von Einzelementen im Nervensystem. In: "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag, München 1964.

F. JENIK: Zur Theorie des Nervenimpulses. In: "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag, München 1964.

H. DRISCHL: Über die Beeinflussbarkeit der Parameter biologischer Regelsysteme des Organismus. In "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag, München 1964.

L. VON HAMOS: Nichtlineare Regelungsvorgänge in der Technik und in der Biologie. In "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag, München 1964.

A. A. MALINOWSKI: Typen biologischer Steuersysteme und ihre Anwendungsmöglichkeiten. In: "Probleme der Kybernetik", Bd. 4, Akademie-Verlag, Berlin 1964.

R. WAGNER: Probleme und Beispiele biologischer Regelung. Richard Thieme-Verlag, Stuttgart 1954.

H. ZEMANEK: Regelungsvorgänge in lebenden Wesen. MTW-Mitteilungen, Wien, 6/1959, Heft 1, Seite 26.

S. N. BRAJNES, A. V. NAPALKOW, V. B. SWETSCHINSKI: Neurokybernetik. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin 1965.

H. Kurz: Vollständige Modelldarstellung des bedingten Reflexes in "Lernende Automaten", Oldenbourg-Verlag, München 1961.

I. P. PAWLOW: Vollständige Gesamtausgabe. Akademie-Verlag, Berlin 1956. Band III.

L. W. KRUSCHINSKI: Untersuchung der extrapolierenden Reflexe bei Tieren in "Probleme der Kybernetik", Bd. 2, Akademie-Verlag, Berlin 1963.

L. W. KRUSCHINSKI: Die normale und die pathologische Formierung des Verhaltens von Tieren. 1

### **Literatur zum Kapitel 10**

G. ASSER: Einführung in die mathematische Logik. Teil I: Aussagenkalkül. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1959.

E. BERKELEY: Symbolic logic and intelligent machines. New York 1959. (Formale Logik und Intelligenzmaschinen.)

H. HERMES: Einführung in die mathematische Logik. Münster 1957.

D. HILBERT, W. ACKERMANN: Grundzüge der theoretischen Logik. 4. Aufl., Springer-Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959.

G. KLAUS: Moderne Logik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1964.

- S. C. KLEENE: Introduction to Metamathematics. North-Holland Publ. Co. 1952. (Einführung in die Metamathematik.)
- P. NOWIKOW: Elemente der mathematischen Logik. Moskau 1959
- W. SEGETH: Elementare Logik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1966.
- A. M. GAWRILOW: Relaisschalttechnik für Stark- und Schwachstromanlagen. Verlag Technik, Berlin 1953.
- GR. C. MOISIL: Entwicklungsstand und Perspektiven der Theorie der konkreten und der abstrakten endlichen Automaten in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.
- W. N. ROGINSKIJ: Grundlagen der Struktursynthese von Relaisschaltungen. Oldenbourg-Verlag, München 1962.
- U. WEYH: Elemente der Schaltungs algebra. Oldenbourg-Verlag. München 1961.
- W. S. MCCULLOCH, W. PITTS: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In "Bulletin of mathematical biophysics", vol. 5/1948, page 115. (Ein logischer Kalkül für die Vorgänge bei der Nerventätigkeit.)
- S. C. KLEENE: Representation of events in nerve nets and finite automata. In "Automata Studies". Annals of Mathematic Studies, 34, Princeton 1956. (Die Darstellbarkeit von Ereignissen in Nervennetzen und endlichen Automaten.) .
- P. H. STARKE: Theorie der Nervennetze in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.
- P. H. STARKE: Einführung in die Theorie der Nervennetze in "Deutsche Zeitschrift für Philosophie", Heft 1 / 1965.
- R. CARNAP: Induktive Logik und Wahrscheinlichkeit. Springer-Verlag, Wien 1959.
- H. GEBELEIN, H. J. HEITE: Statistische Urteilsbildung. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951.
- G. POLYA: Mathematik und plausibles Schließen. Band I: Induktion und Analogie in der Mathematik. Birkhäuser-Verlag, Basel/Stuttgart 1962.
- A. SUNIWOJEW: Philosophische Probleme der mehrwertigen Logik. 1960

### **Literatur zum Kapitel 11**

- G. AMON: Moderne Bauelemente für Rechenmaschinen in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik", Akademie-Verlag. Berlin 1963.
- E. GITIS: Signalwandler für elektronische Digitalrechner. Moskau 1961
- N. E. KOBRINSKI, B. W. TRACHTENBROT: Einführung in die Theorie der endlichen Automaten. Kap. 8. Akademie-Verlag, Berlin 1967.
- W. S. MALOW: Fernmessung, Fernmeldung, Fernsteuerung in elektrischen Anlagen. Verlag Technik, Berlin 1954.
- U. RÖSLER: Dünne ferromagnetische Schichten in der digitalen Technik in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1968.
- K. STEINBUCH: Die Lernmatrix in "Kybernetik", Heft 1/1961, Seite 36 bis 45.
- K. STEINBUCH: Automat und Mensch. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.
- H. WINKLER: Probleme der Analogieelektronik und der digitalen Rechentechnik in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.
- Sammelband: Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Springer-Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg



1962.

Sammelband: Handbuch der Automatisierungstechnik. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin-Borsigwalde 1959.

Sammelband: Digitale Informationswandler. Vieweg-Verlag, Braunschweig 1962.

### **Literatur zum Kapitel 12**

M. S. TUKATSCHINSKI: Maschinen als Mathematiker. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960.

H. ADLER: Elektronische Analogrechner. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1962.

D. ERNST: Elektronische Analogrechner. Oldenbourg-Verlag, München 1960.

H. KINDLER: Elektrische Modelle in der Kybernetik in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik", Akademie-Verlag, Berlin 1963.

KORN-KORN: Elektronische Analogierechenmaschinen. Verlag Technik, Berlin 1962.

H. WINKLER: Elektrische Analogieanlagen. Akademie-Verlag, Berlin 1961.

N. KOBRINSKI: Stetig arbeitende mathematische Maschinen. 1954

W. MEYER ZUR CAPELLEN: Instrumentelle Mathematik für den Ingenieur. Verlag W. Girardet, Essen 1952.

A. WILLERS: Methoden der praktischen Analysis. Sammlung Göschen Band 12, de Gruyter-Verlag, Berlin 1957.

E. BERKELEY: Symbolic logic and intelligent machines. New York 1959.

M. GARDNER: Logic Machines and Diagrams. (Logische Maschinen und Diagramme.) Mc Graw Hill, New York 1958.

O. BUNKE: Theorie strategischer Spiele in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik", Akademie-Verlag, Berlin 1963.

E. BURGER: Einführung in die Theorie der Spiele. Verlag de Gruyter, Berlin 1959.

J. v. NEUMANN, O. MORGENSTERN: Spieltheorie und ökonomisches Verhalten. Physica-Verlag, Würzburg 1961.

J. WENTZEL: Elemente der Spieltheorie. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962.

I. D. WILLIAMS: The compleat strategyst. (Der vollkommene Stratege.) McGraw Hill, New York 1954.

G. ASSER: Die algebraische Theorie der Automaten in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963. V. M. GLUSCHKOW: Die Theorie der abstrakten Automaten. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1963.

N. E. KOBRINSKI, B. W. TRACHTENBROT: Einführung in die Theorie der endlichen Automaten. Akademie-Verlag, Berlin 1967.

### **Literatur zum Kapitel 13**

N. A. ARCHANGELSKI, B. I. SAIZEW: Automatische Ziffernrechenmaschinen. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960.

W. KÄMMERER: Ziffernrechenautomaten. Akademie-Verlag, Berlin 1960 (2. Aufl.).

A. I. KITOW, N. A. KRINIZKI: Elektronische Digitalrechner und Programmierung. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962.

A. I. KITOW, N. A. KRINIZKI: Wie arbeitet eine elektronische Rechenmaschine? Fachbuch-

Verlag, Leipzig 1960.

H. RUTISHAUSER, A. SPEISER, E. STIEFEL: Programmgesteuerte digitale Rechengeäte. Birkhäuser-Verlag, Basel 1951.

G. AMON: Moderne Bauelemente für Rechenmaschinen in "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.

K. GOSSLAU: Der Magnetkernspeicher, ein Schnellspeicher in Nachrichtenverarbeitungsmaschinen, sein Aufbau und seine Wirkungsweise. In "Regelungstechnik" Heft 9/1958.

A. N. MJAMLIN, W. K. SMIRNOW: Elektronenstrahlröhren als Operationsspeicher. In "Probleme der Kybernetik", Band 2, Akademie-Verlag, Berlin 1963. E. SCHAEFER: Vergleich neuer Speicherelemente für elektronische Rechenmaschinen. In "Elektronische Rechenanlagen" Heft 4/1960.

L. KRAJSMER: Anlagen zur Speicherung diskreter Information. Moskau 1961

M. KARZEW: Rechenwerke elektronischer Rechenmaschinen. Moskau 1958

W. D. BELKIN: Kybernetik und Ökonomie. In "Sowjetwissenschaft - Gesellschaftswissenschaftliche Beiträge", Heft 10/1962.

E. P. BILLETTER: Der praktische Einsatz elektronischer Rechenautomaten. Springer-Verlag, Wien 1961.

B. L. CARDAZO: Wettervorhersage mittels elektronischer Rechenanlagen (Holländisch). In "Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde", Amsterdam, Heft 14/1958, S. 165.

P. GEBHARDT-SEELE: Rechenmodelle für wirtschaftliches Lagern und Einkaufen. Oldenbourg-Verlag, München 1962.

M. GONTSCHARENKO: Die Kybernetik im Kriegswesen. Moskau 1960

L. GUTENMACHER: Elektronische informationsverarbeitende Maschinen. 1962

F. HOFFMANN: Einsatzplanung elektronischer Rechenanlagen in der Industrie. Oldenbourg-Verlag, München 1961.

N. MCDONALD: Over 300 areas of applications of computers. (Über 300 Anwendungsgebiete für Rechenautomaten.) In "Computers and automation", Berkeley Enterprises, Washington, vol. 9/1960.

A. SASONOW: Elektronische Ziffernrechner und ihre Anwendung in der Hochseeschifffahrt. Leningrad 1960

Kybernetik in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft der DDR. Akademie-Verlag, Berlin 1963.

E. B. BABSKI, L. S. ULJANINSKI: Elektrische Stimulation des Herzens. Moskau 1961

W. D. MOISSEJEW: Fragen der Kybernetik in Biologie und Medizin. Akademie-Verlag, Berlin. 1968.

W. W. PARIN, R. M. BAJEWSKI: Kybernetik in Medizin und Physiologie. Moskau 1963

E. AGRICOLA: Probleme des Wörterbuchs in der automatischen Übersetzung. In "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.

O. S. KULAGINA: Die Beschreibung von Übersetzungsalgorithmen mit Hilfe der Operatorenmethode und die automatische Programmierung solcher Algorithmen. In "Probleme der Kybernetik", Bd. 2. Akademie-Verlag, Berlin 1963.

J. KUNZE: Über die Aufstellung von Übersetzungsalgorithmen und deren Programmierung. In "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.

J. KUNZE, P. STARKE: Maschinen als Dolmetscher. Urania 7 Wissen und Leben, Heft 6/1963.

G. F. MESA: Stand und Probleme der automatischen Übersetzung. In "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik". Akademie-Verlag, Berlin 1963.

A. S. BARSOW: Was ist lineare Programmierung? B.-G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964.

R. BELLMANN: Dynamic Programming. Princeton University Press 1957.

S. I. GASS: Linear Programming - methods and applications. (Lineare Programmierung - Methoden und Anwendungen.) McGraw Hill, New York 1958.

J. PIEHLER: Einführung in die lineare Optimierung. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962.

#### **Literatur zum Kapitel 14**

S. ROWENSKI, A. UJOMOW, J. UJOMOWA: Maschine und Gedanke. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin, Passat-Buch, Nr. 44, 1962.

W. R. ASHBY: An introduction to cybernetics. (Eine Einführung in die Kybernetik.) Shapman & Hall. London 1956.

K. D. LEEUW, E. F. MOORE, C. E SHANNON, N. SHAPIRO: Computability by probabilistic machines. (Berechenbarkeit durch stochastische Maschinen.) In "Automata Studies", Annals of Mathematics Studies 34, Princeton 1956.

T. LUTZ: Über ein Programm zur Erzeugung stochastisch-logischer Texte. In "Grundlagenstudien" 1/1960, Seiten 11 bis 16 und 127 bis 128.

J. v. NEUMANN: Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. (Wahrscheinlichkeitslogik und die Synthese zuverlässiger Organismen aus unzuverlässigen Elementen.) In "Automata Studies", Annals of Mathematics Studies 34. Princeton 1956.

G. PASK: Statistical computation and statistical automata. (Statistische Berechnung und statistische Automaten.) In "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag. München 1964

M. O. RABIN: Probabilistic Automata. (Stochastische Automaten.) In "Information and control", Academic Press, New York, issue 6/1963, page 230.

P. H. STARKE: Theorie stochastischer Automaten. In "Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik", Heft 1, 2/ 1965, Akademie-Verlag, Berlin.

A. M. UTTLEY: Conditional probability machines and conditioned reflexes. (Stochastische Maschinen und bedingte Reflexe.) In "Automata Studies", Annals of Mathematics Studies 34. Princeton 1956.

M. A. AISERMAN: Lernvorgänge bei der Erkennung von Zeichenklassen. In "Neuere Ergebnisse der Kybernetik", Oldenbourg-Verlag, München 1964.

R. BUSH, F. MOSTELLER: Stochastic Models for learning. (Stochastische Modelle für das Lernen.) Studies in mathematical learning theory. (Beiträge zur mathematischen Lerntheorie.) Stanford University Press 1959.

O. W. HASELOFF: Einige Hypothesen zur Struktur von Lernprozessen. In "Neuere Ergebnisse der Kybernetik". Oldenbourg-Verlag, München 1964.

H. H. MARTENS: Two notes on machine "learning". (Zwei Bemerkungen zum Thema "lernende" Maschinen.) In "Information and Control", issue 2/1959, page 364.

#### **Literatur zum Kapitel 15**

P. K. ANOCHIN: Physiologie und Kybernetik. In "Kybernetik und Praxis"- Neue Beiträge.

VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1968.

W. R. ASHBY: Design for a brain. (Entwurf für ein Gehirn.) Wiley, New York 1952.

S. N. BRAJNES, A. W. NAPALKOW, W. B. SWETSCHINSKI: Neurokybernetik. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin 1965.

F. KLIX: Bemerkungen über einige mathematisch-kybernetische Probleme in der psychologischen Forschung. In "Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik", Akademie-Verlag, Berlin 1963.

A. W. NAPALKOW: Einige Prinzipien der Gehirntätigkeit. In "Probleme der Kybernetik", Bd. 4, Akademie-Verlag, Berlin 1964.

J. v. NEUMANN: Die Rechenmaschine und das Gehirn. Oldenbourg-Verlag, München 1960. Original: The computer and the brain. Yale University Press, New Haven 1958.

G. W. WALTER: The living brain (Das lebende Gehirn.) Duckworth, London 1957.

### **Literatur zum Kapitel 17**

A. FELDBAUM: Rechenanlagen in automatischen Systemen. Moskau 1959

J. AUERHAN: Die Automatisierung und ihre ökonomische Bedeutung. Verlag Die Wirtschaft, Berlin 1961.

H. GEYER: Einfache Modelle des volkswirtschaftlichen Prozesses als Regelkreis. In "Volkswirtschaftliche Regelungsvorgänge". Oldenbourg-Verlag, München 1957.

Grundlagen der marxistischen Philosophie. Dietz Verlag, Berlin 1959.

HAGELBERGER: SIR - ein Automat, der Folgen extrapoliert. Heft 1/1960.

G. KLAUS: Kybernetik in philosophischer Sicht. Dietz Verlag, Berlin 1964.

G. KLAUS: Zur Soziologie der "Mensch-Maschine-Symbiose". In "Deutsche Zeitschrift für Philosophie", Heft 7/1962.

A. KOLMOGOROW: Automaten und Leben. In "Sowjetwissenschaft - Gesellschaftswissenschaftliche Beiträge" 11/1964.

Kybernetik als soziale Tatsache. Bergedorfer Protokolle V, Decker-Verlag, Hamburg/Berlin 1968.

W. I. LENIN: Marx-Engels-Marxismus. Moskau 1947.

S. LILLEY: Automation and social progress. (Automation und gesellschaftlicher Fortschritt.) Lawrence & Wishart, London 1957.

Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik. Akademie-Verlag, Berlin 1963.

Regelungsvorgänge in der Biologie. Sammelband. Oldenbourg-Verlag, München 1956.

ROWENSKI, UJOMOW, UJOMJWA: Maschine und Gedanke. Urania-Verlag, Leipzig/Berlin/Jena 1962.

K. STEINBUCH: Automat und Mensch. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.

N. WIENER: Kybernetik, Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine. Bean-Verlag, Düsseldorf/Wien 1963.

W. WIESER: Organismen, Strukturen, Maschinen. Fischer Bücher, Frankfurt a. M./Hamburg 1959.