

**Zeitschrift:** Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift

**Herausgeber:** Bauen + Wohnen

**Band:** 14 (1960)

**Heft:** 12: Wohnen, Ausstellen = Habiter, exposer = Home, exhibition

**Artikel:** Vom Wesen der Analogien und die Bedeutung der Komplexität

**Autor:** Wieser, Wolfgang

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-330494>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

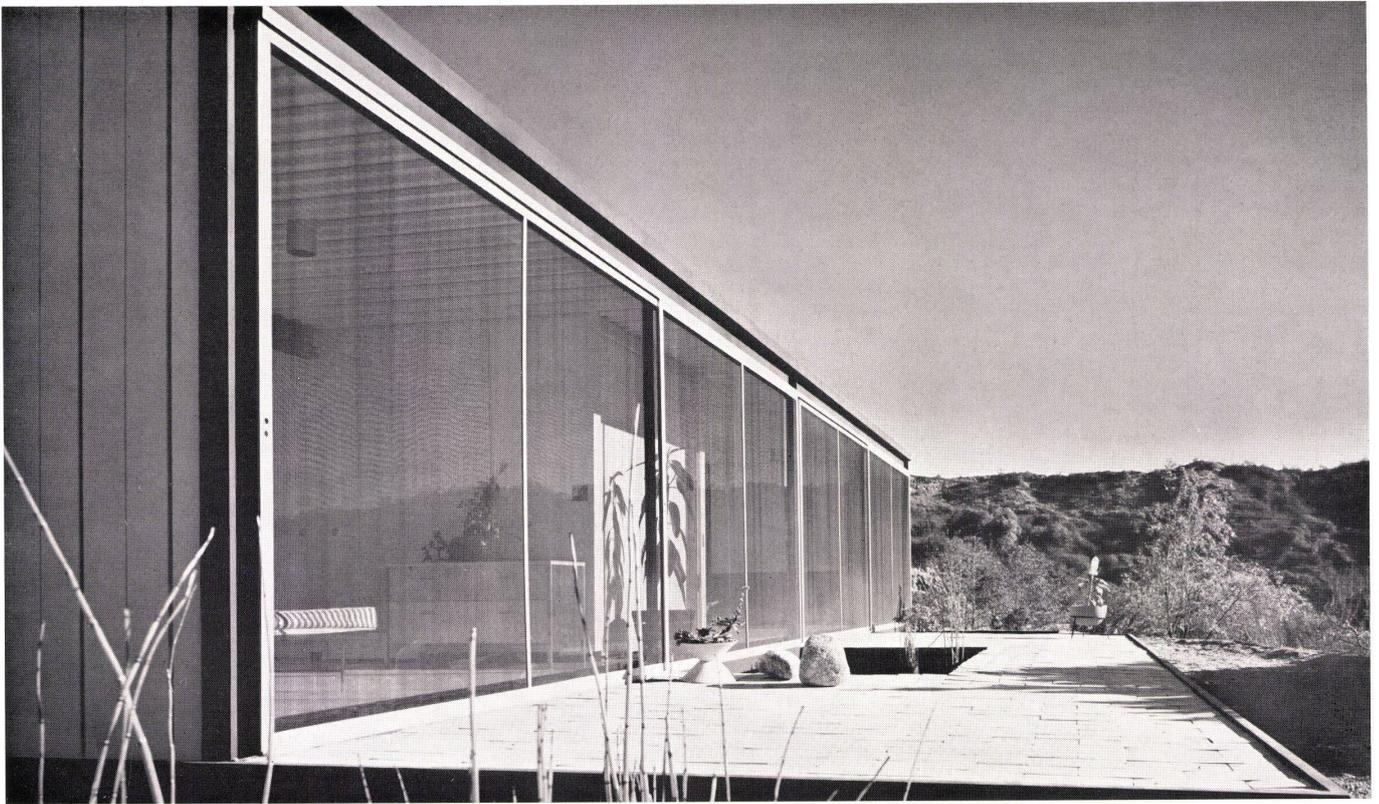
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

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



3

Seite 434 / page 434

1

Der Autoabstellplatz links, im Hintergrund Eßraum und Küche und rechts der Arbeitsraum.

Garage à gauche, à l'arrière-plan l'aire des repas et cuisine, à droite le studio de travail.

The garage, left, in the background, dining-room and kitchen and, right, the study.

2

Der Autoabstellplatz, wie er vom Eßraum aus gesehen wird.

Le garage vu depuis l'aire des repas.

The garage as viewed from the dining-room.

Seite 435 / page 435

3

Die Südfassade vor dem Schlafzimmer links und dem Wohnraum rechts. Die Scheiben sind 3 x 3 m groß, je zwei Scheiben zusammen bilden im Stahlrahmen vor dem Schlafzimmer bzw. vor dem Wohnraum eine Schiebe-

wand, die gegenüber dem Rahmen der festverglaste Front leicht zurückgesetzt ist. Hinter dem Glas — auf der Innenseite — ist ein durchsichtiger Netzvorhang, Kohlshade genannt, gespannt. Dieser Vorhang dämmt die Einwirkung der Sonnenstrahlen. Er kann im Winter zurückgeschoben werden.

La façade sud devant la chambre à coucher à gauche et la salle de séjour à droite. Les vitres sont de 3 sur 3 mètres. Les deux parties vitrées forme porte coulissante devant la chambre à coucher et la salle de séjour derrière le vitrage fixe. Derrière le vitrage, du côté intérieur, un rideau-filet appelé «coalshade». Ce rideau protège contre les rayons du soleil. En hiver on le repousse sur le côté.

The south elevation in front of the bedroom, left, and the living-room, right. The panes measure 3 x 3 m., two panes together forming in the steel frame in front of the bedroom or in front of the living-room a sliding wall, which is recessed in relation to the frame of the fixed-pane windows. Behind the glass—on the interior—there is a transparent net curtain, called Coalshade. This curtain furnishes protection against bright sunlight. It can be pushed back in winter.

Wolfgang Wieser

## Vom Wesen der Analogien und die Bedeutung der Komplexität

Der zweite Beitrag<sup>1</sup> des Biologen und Zoologen Wolfgang Wieser handelt unter anderem von Unterschied zwischen Organismen und Maschinen. Die Gedanken können unmittelbar auf Phänomene der Architektur übertragen werden. Die Sprachverwirrung ist so groß, daß sie falsche und unlogische Schlüsse veranlassen kann. Wir nennen noch einmal das Wort »Organische Architektur« und die Vorstellungen, die damit verbunden werden. Viele Gedanken und Begriffe Wiesers können unmittelbar in die Sprache übernommen werden, deren man sich in der Architekturtheorie und Architekturkritik bedient. f

<sup>1</sup> Vergleiche Nr. 11/1960, Seite 399 ff.

Unter Analogie versteht man die Abbildung derselben Funktion in verschiedenen Materialien und mittels verschiedener Prinzipien. So ist z. B. der Flügel eines Vogels analog dem Flügel eines Schmetterlings, denn dieselbe Funktion — das Fliegen — wird einmal mit den Mitteln des Wirbeltiers, das andere Mal mit denen des Insektenbauplans erreicht. Von Bedeutung ist, daß essentielle Funktionen und Mechanismen, nicht bloß akzidentelle Formen und Bewegungen, abgebildet werden. Wenn wir in einem knorrigen Baumstamm ein menschliches Antlitz wiederzuerkennen glauben, so beruht dies auf Ähnlichkeit, nicht auf Analogie. Diese Unterscheidung ist nicht immer klar begriffen worden, was sich unter anderem am Wandel der Vorstellungen über »Modelle des Lebens« aufzeigen läßt. In einem mythischen Zeitalter glaubte man, daß bloße Gestaltähnlichkeit auch schon Funktionsähnlichkeit bedeute. Dies ist jedenfalls die abstrakte Erklärung für Phänomene des Fetischismus und Symbolismus. Formt ein Primitiver aus Ton das Abbild eines lebendigen Wesens, so glaubt er, daß gleichzeitig mit der Ähnlichkeit auch die Eigenschaften des Vorbildes in das »Modell« eingegangen seien.

Im 19. Jahrhundert stand man so unter dem Eindruck gewisser Ähnlichkeiten zwischen organischen und anorganischen »Grundvorgängen« wie Wachstum, Teilung, Assimilation usw., daß man glaubte, in letzteren ein-

fache Modelle der ersteren entdeckt zu haben. Das stellte sich aber bald als ein Irrtum heraus. Das Wachsen eines Kristalls und eines Lebewesens ist nur im ganz größten Sinne ähnlich; es ist nicht analog, denn die zugrunde liegenden Mechanismen sind in den beiden Systemen total verschieden.

Insofern mag diese Periode von Vorteil gewesen sein, da sie die Einsicht vorbereitete, daß man eigentlich nicht nach »Modellen des Lebens«, sondern nach »Modellen von Lebensvorgängen« suchte, zumindest waren es nur solche, die man fand. Die Unterscheidung zwischen »Leben« und »Lebensvorgängen« ist hierbei sehr wichtig. Niemand wird z. B. bezweifeln, daß die Leistungen von Organismen statischen Regeln folgen müssen. Wenn wir erfahren, daß sich die Anordnung der Zug- und Drucklinien im Wirbeltierknochen bestimmten, errechenbaren Gesetzen fügt und daß wir dieselbe Anordnung auch in den Streben einer Stahlkonstruktion mit ähnlichen statischen Aufgaben, wie sie einem Knochen aufgegeben sind, wiederfinden, so werden wir diese Analogie zur Kenntnis nehmen und sicher nicht folgern, daß sich das Leben durch statische Regeln »erklären« lasse. Dies gilt für alle technischen Analogien. Nie wird das Leben selbst, sondern immer nur ein Lebensvorgang oder ein Teilmechanismus lebendiger Organismen abgebildet. Auf diesen Punkt komme ich weiter unten noch zu sprechen.

Nun hat die Technik in den letzten Jahrzehnten Apparate entwickelt, deren Übereinstimmung mit gewissen Lebensvorgängen von prinzipiellerer Art ist, als die vagen Form- und Bewegungsähnlichkeiten früherer Modelle sich rühmen konnten. Es besteht dadurch die Möglichkeit, daß die jetzigen Modelle des Lebens tatsächliche Strukturähnlichkeiten, also Analogien, aufzeigen. Ich sage, »es besteht die Möglichkeit«, denn sehr oft ist die Unterscheidung zwischen Analogie und bloßer Ähnlichkeit nicht von vornherein evident. Diese Ungewißheit ist proportional unserem Mangel an Einsicht in die tatsächliche Struktur der Systeme, mit denen wir uns beschäftigen. Wir verstehen das Funktionieren von Organismen noch viel zu wenig, als daß wir mit absoluter Sicherheit sagen könnten: Dieses — und nur dieses — Modell bildet einen gewissen biologischen Mechanismus ab.

Im vorigen habe ich das Wort »Abbildung« gebraucht, um die Art und Weise der Beziehung zwischen lebendigen Organismen und ihren technischen »Modellen« zu charakterisieren. Dem Prinzip der Analogie gemäß kann ein technisches Modell nie mehr als ein Abbild des darzustellenden biologischen Mechanismus leisten, es kann nie identisch mit ihm werden. Die bisherigen technischen Modelle haben also einzelne Lebensvorgänge, organische Prinzipien usw. abgebildet, und im Rahmen dieser Beschränkung sind dem Fortschritt keine Grenzen gesetzt. Die Arbeiten von McCulloch, Pitts u. a. machen sogar wahrscheinlich, daß alle biologischen Funktionen, die eindeutig definierbar sind, auch durch Modelle abgebildet werden können. Die Betonung liegt hier auf »eindeutig definierbar«. Solange sich eine bestimmte biologische Leistung auf einer bestimmten Ebene vollkommen beschreiben läßt, wird man auch einen technischen Mechanismus bauen können, der die betreffende Leistung genauso gut wie das Vorbild zustande bringt. Die Reaktionsweisen eines hungrigen Tieres lassen sich etwa auf der Verhaltensebene folgendermaßen beschreiben: Rastlosigkeit, zielloses Herumsuchen, Auffinden von Nahrung, Fressen, Eintreten eines Ruhezustandes. Diese Reaktionskette kann nun aber auch exakt durch ein technisches Modell reproduziert werden. Exakt allerdings nur, wenn die Ebene des Verhaltens nicht verlassen wird. Beginnt man zu fragen, was für innere Vorgänge denn etwa die Rastlosigkeit des Tieres verursachen, so wird die Sache immer verwickelter. Dies führt uns darauf, daß die rationale Beschreibbarkeit einzelner biologischer Leistungen nicht zum Beweis dafür genommen werden darf, daß auch das Leben schlechthin rationalisierbar sei.

Über diese Unmöglichkeit der Verallgemeinerung kann auf mehreren Ebenen argumentiert werden. Zunächst einmal sehen wir gewissermaßen nur die Außenseite einer biologischen Leistung, nur die dreidimensionale Projektion eines vierdimensionalen Ereignisses. Jeder einzelne organische Prozeß ist untrennbar verknüpft mit der historischen Situation des Lebens, mit der Entstehung und Entwicklung organischer Moleküle, des Protoplasmas, der Organe — und hier rühren wir an einen ungeheuren Komplex von Ereignissen, die zwar den beschreibbaren Prozeß bedingen, sich in dessen Beschreibung jedoch nicht rational einfügen. Wenn wir also auch den einzelnen Prozeß auf einer gewissen Ebene verstehen und mechanisch abbilden können, so ist das Phänomen des Lebens an sich prinzipiell unwiederholbar durch Produkte menschlicher Erfindung.

So gesehen ist dies eigentlich selbstverständlich, und es mag besser sein, vom Historischen

abzusehen und die Frage zu stellen, ob es denn möglich sei, einen Organismus, wie er uns — hic et nunc — vorliegt, durch eine Maschine nachzubauen — und zwar so nachzubauen, daß man selbst bei sorgfältigster Prüfung zwischen dem Organismus und dem Modell keinen Unterschied entdecken könne. Die Diskussion, ob ein derartig vollkommenes Modell prinzipiell möglich sei oder nicht, hat natürlich rein akademischen Charakter, doch scheinen mir die Argumente, die dagegen sprechen, großes Gewicht zu haben. Der Grund hierfür ist folgender: Um das Modell irgendeiner biologischen Leistung bauen zu können, muß ich den Mechanismus dieser Leistung eindeutig beschreiben können. Ein Schaltplan ist eben etwas durchaus Rationales und läßt sich nur dann anlegen, wenn die Funktion, die ich durch ihn ausdrücken will, auch rationalisiert ist. Wie schon angedeutet, lassen sich einzelne biologische Leistungen und Prozesse derartig rationalisieren, sie können gleichsam aus dem Zusammenhang des organischen Verbandes herausgelöst werden, ohne ihre Identität zu verlieren. So lassen sich zahlreiche Reflexe und Gestaltkreise behandeln: das Schlucken, Gehen, Sprechen, Niesen usw. — jeder auf seiner spezifischen Ebene. Aber daneben gibt es Eigenschaften und Leistungen, die sich eben nicht aus dem organischen Verband herauslösen lassen, die überhaupt nur als Produkte des intakten Organismus verständlich sind. Wie benimmt sich z. B. ein Verliebter? Wie will man das hier vorliegende totale Verhaltens- und Erscheinungsbild auflösen? Wir erleben die Liebe und wir erfahren ihre Wirkungen, aber begreifen, also rationalisieren können wir sie selbst auf der Verhaltensebene nicht. Das heißt, wir können sie nicht einmal genau beschreiben. Wie will man dann aber einen Schaltplan und eine Maschine bauen, die jene Reaktionen zeigt, auf Grund deren wir sagen müßten, sie liebe? Gewiß, man kann einer Maschine das Verfertigen von Liebesgedichten beibringen, man kann ihr beibringen, zu erröten, wenn ein Mädchen vorbeigeht, aber diese einzelnen Verhaltensweisen wären von der Vielfalt der möglichen Beziehungen, durch die sich die Liebe ausdrückt und ausdrücken kann, noch ebenso weit entfernt wie die Klänge, die eine Katze beim Spazierengehen über Klaviertasten hervorbringt, von der musikalischen Welt Mozarts.

Aus isolierten Prozessen und Stücken kann also der ganze Organismus mit seinen vielfältigen Funktionen nicht wieder zusammengesetzt werden. Innerhalb des Organismus besitzt jedes Element nicht bloß seine elementaren, sondern auch einen Teil der Systemfunktionen, die sich aus der unendlichen Verknüpfung der Elemente ergeben. Eine Kenntnis der Ursachen dieser Systemeigenschaften ist nur in beschränktem Maße zu gewinnen, denn das Funktionieren eines Systems ist zwar evident, d. h. drückt sich in seinem Verhalten aus, kann aber nur in einfachen Fällen durch das Auseinandernehmen der Verbindungen auch analytisch begriffen werden. Die Dissektion zerstört ja genau jene Voraussetzung — die Ganzheit des Systems —, auf der das zu analysierende Verhalten ruht.

Mit anderen Worten: Ein hochkompliziertes System wie ein Organismus kann nicht in beschreibbare Einzelprozesse zerlegt werden, ohne daß ein unauflösbarer »Rest« bleibt, es ist also nicht rationalisierbar, kann also auch nicht vollkommen durch ein technisches Modell abgebildet werden.

Der Unterschied zwischen Organismen und Maschinen ist nicht der zwischen irrational und rational, denn wie wir sahen, sind die Leistungen eines Organismus im einzelnen

durchaus rationalisierbar, und wie die Technik zeigt, gibt es bei modernen elektronischen Maschinen (und verborgenermaßen sogar bei allen Maschinen) auch ein irrationales Element. Aber in Organismen und Maschinen befinden sich die Ebenen des Rationalen und Irrationalen auf verschiedener Höhe. Bei Maschinen ist der Plan rational, und nur in der Verwirklichung, also dem tatsächlichen Bau der Maschine, schleicht sich ein irrationales Element ein. Dies hat mit unkontrollierbaren Phänomenen, wie dem »Spiel« einer Achse oder dem »Geräusch« in elektrischen Leitern zu tun. Beim Organismus müssen wir uns aber erst aus Bau und Funktion den Plan erschließen — und hier finden wir, daß der Plan selbst in seiner Vollständigkeit nicht rationalisierbar ist. Wenn wir uns im übrigen mit einer Maschine wie mit einem Organismus beschäftigen, also zerlegend und ohne den Plan, nach dem sie gebaut wurde, zu kennen, so dürfte es eine Stufe der Komplexität geben, wo es sich ebenfalls als unmöglich herausstellen wird, aus der Erscheinungsform den zugrundeliegenden Plan eindeutig zu erschließen.

Wie unterscheiden sich denn überhaupt verschiedene Systeme? Vergleichen wir z. B. im Gebiet der Technik eine Dampfmaschine, ein Auto, ein Radio und eine elektronische Rechenmaschine miteinander, so scheint es, als ob differenziertere Leistung irgendwie mit komplizierterer Bauart Hand in Hand ginge. Und was heißt kompliziertere Bauart? Doch sicher nicht bloß größere Zahl von Bausteinen — dann wäre nämlich die Chinesische Mauer eines der kompliziertesten Instrumente —, sondern größerer Reichtum an Beziehungen zwischen den Elementen. Wegen ihrer Wichtigkeit seien diese beiden Gesichtspunkte in Form von zwei Hypothesen hier noch einmal formuliert:

1. Die verschiedenen Eigenschaften und Wirkungsgrade von Systemen beruhen auf verschiedenen Graden ihrer Komplexität.
2. Die Komplexität eines Systems hängt nicht von der Zahl der Elemente, sondern vom Reichtum ihrer Beziehungen ab.

Es leuchtet ein, warum diese beiden Hypothesen von so großer Wichtigkeit sind; sie reduzieren nämlich die sehr undurchsichtigen Begriffe »Wirkungsgrad« und »Eigenschaften« eines Systems auf etwas viel Faßbareres, das sich irgendwie durch das Studium der Beziehungen zwischen Elementen darstellen lassen muß.

In diesen Hypothesen wird kein Versuch gemacht, die Verschiedenheiten von Systemen durch qualitative Unterschiede ihrer Elemente zu begründen.

Das Ehrenfels-Kriterium der Gestaltpsychologen besagt, daß »ein Ganzes mehr als die Summe seiner Teile« sei. Eine sehr ungenaue Formulierung, denn was ist überhaupt eine »Summe von Teilen«? Die einzige Definition, die dem Kriterium einen — wenn auch trivialen — Sinn gibt, ist jene, die unter Summe einen ungeordneten Haufen von Teilen versteht. Noch in einem Aufsatz jüngerer Datums findet sich die Behauptung, daß das Kriterium typischerweise auf Lebewesen zutrefe, während Maschinen z. B. nie mehr als die Summe ihrer Teile seien, da bei ihnen jeder Teil auswechselbar ist und nach Zerlegung genau das bleibt, was er in der Maschine war. Das ist natürlich ganz naiv. Eine Elektronenröhre in einer Rechenmaschine ist zwar dasselbe Gebilde aus Glas und Metall, das sie in isoliertem Zustand darstellt, aber die Rechenmaschine ist entschieden mehr als ein ungeordneter Haufen von Elektronenröhren. Was aus diesen erst eine Maschine macht, sind die entsprechenden Schaltregeln, die System-

gesetze, und um diese Systemgesetze ist jedes »Ganze« — also auch eine Maschine — reicher als die »Summe seiner Teile«. Die Auswechselbarkeit von Teilen ist hier ohne Belang. Auch in einem lebenden Organismus können Teile ersetzt werden.

Ein Schaltelement kann so gebaut werden, daß es bloß zwei Verhaltensformen: Aktivität und Nicht-Aktivität, besitzt. Der englische Physiologe W. Grey Walter hat nun in seinem Buch »The Living Brain« gezeigt, daß ein System, bestehend aus zwei derartigen Elementen — nennen wir sie A und B —, sieben mögliche Verhaltensweisen besitzt, nämlich: 1. Keines der beiden ist aktiv, 2. A ist aktiv, B nicht, 3. B ist aktiv, A nicht, 4. A und B sind unabhängig voneinander aktiv, 5. A beeinflusst B, 6. B beeinflusst A, 7. A und B beeinflussen einander wechselweise. Walter baute daraufhin eine Maschine, »machina speculatrix« genannt, bei der zwei Schaltelemente miteinander sowie mit einem Rezeptor und einem Effektor derartig verbunden sind, daß sie sich auf sämtliche Verhaltenskombinationen einstellen können. Eine solche Maschine benimmt sich in mancher Hinsicht wie ein einfaches Lebewesen. Es zeigt positive und negative Reaktionen auf Umweltreize, es »erforscht« die Umwelt, es unterscheidet zwischen zweckvollen und zwecklosen Reaktionen, es stellt sich auf optimale äußere Bedingungen ein und kann Zustände innerer Stabilität erreichen. Was bedeutet dies? Ein Uneingeweihter, der diese Maschine beobachtet, sieht sie Aktionen ausführen, auf Grund deren er ein Wesen, wenn es nur aus Protoplasma anstatt aus Eisen, Glas und Draht bestünde, zu den primitiven Tieren rechnen würde.

So eine Maschine ist natürlich kein Lebewesen, aber sie zeigt Verhaltensweisen, die denen einfacher Lebewesen analog sind. Diese Verhaltensweisen sind, für sich allein betrachtet, der technischen Analyse ebenso zugänglich wie morphologische Strukturen. Der Grund, warum Vitalisten der Neuzeit gegen den Vergleich zwischen Organismen und Maschinen auf morphologischer Ebene wenig einzuwenden haben, es jedoch ablehnen, dem Anspruch Gehör zu schenken, daß elektronische Maschinen gewisse biologische Mechanismen oder Verhaltensweisen von Tieren abbilden, ist darin zu suchen, daß die meisten Nicht-Techniker eine durchaus veraltete Vorstellung davon haben, was eigentlich eine Maschine ist. Sie operieren noch mit Begriffen, die geformt wurden, als Maschinen nichts anderes als »Muskel-Maschinen« waren, denn die Funktion einer Dampfmaschine, eines Krans, eines Autos usw. ist die Nachahmung und Verstärkung der Energieleistung von Organismen: ein Kran soll heben, ein Auto transportieren usw. Die elektronischen Maschinen der Neuzeit sind jedoch keine »Kraft-«, sondern »Nachrichten-« und »Steuerungsmaschinen«, die nicht Energie, sondern Information und Organisation produzieren, also nicht der tierischen Muskulatur, sondern dem Nervensystem ähneln. Kein Wunder, daß diese Verschiebung, ja diese Revolution der technischen Voraussetzungen auch eine Neuordnung der Begriffe verlangt. Wenn man also heutzutage über Maschinen im Zusammenhang von »Maschine und Leben« spricht, dann muß man sich darüber im klaren sein, daß moderne Maschinen Dinge vollbringen, die von den Leistungen der bisher üblichen Maschinen nicht bloß quantitativ, sondern auch qualitativ verschieden sind. Es ist eine Tatsache, mit der sich alle Philosophen vertraut machen müssen, daß die Begriffe Suchen, Zielbewußtsein, Anpassung, Assoziation, Wahl nicht diametral verschieden von den Begriffen sind, die im Reich der Technik

verwendet werden müssen, um die Funktionsweisen moderner Maschinen objektiv zu beschreiben.

Aber kehren wir zum Begriff der Komplexität zurück. Wir sahen, daß die Verknüpfung zweier Elemente sieben verschiedene Verhaltensweisen möglich macht. Sechs Elemente, richtig miteinander verbunden, würden genügend Verhaltensweisen ermöglichen, um einem Menschen während seines ganzen Lebens zehn neue Erfahrungen per Sekunde zu erlauben. Mit der Anzahl der Verbindungen steigt also der Reichtum an Verhaltensweisen eines Systems. So gibt es eine ganze Reihe einfacher Probleme, die machina speculatrix mit ihren zwei Elementen nicht leisten kann; z. B. hat sie kein Analogon für das Lernvermögen von Lebewesen, sie kann keine Erfahrungen speichern. Ein Hinzufügen neuer Elemente und Verbindungen schafft hier jedoch Abhilfe. Walter baute eine weitere, nur etwas kompliziertere Maschine, »machina docilis«, die durch Erfahrung lernen kann, ohne daß dabei dem Begriff »Lernen« ein neuer Inhalt gegeben werden müßte.

Wenn wir sagen: ein Lebewesen lernt, dann verstehen wir darunter doch, daß dieses Lebewesen auf ein bestimmtes Ereignis der Umwelt zuerst mit einer ungeordneten Folge von Verhaltensweisen und später mit einer ganz bestimmten, spezifischen Verhaltensweise reagiert. Die Beziehung zwischen dem Umweltereignis und der zugeordneten Verhaltensweise ist nach dem Lernprozeß keine bloß mögliche und zufällige, sondern eine dauerhafte und gesetzmäßige. Der Umschwung tritt ein, wenn eine Reaktion auf einen Reiz mehrere Male zu einem erstrebenswerten Zustand geführt hat. Das Lebewesen merkt sich die günstige Sequenz der Ereignisse und reagiert später auf den auslösenden Reiz sofort — ohne erst herumzuprobieren — mit dem entsprechenden Verhalten.

Das Knüpfen dieser Beziehung läßt sich auf einen statistischen Mechanismus reduzieren. Wenn z. B. Reaktion R auf Reiz B einmal zum Erfolg geführt hat, dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß auch beim nächsten Auftreten von Reiz B die Reaktion R zum Erfolg führen wird, um ein geringes größer als für jede andere Reaktion. Die Wahrscheinlichkeit erhöht sich mit jeder erfolgreichen Reizbeantwortung und wird schließlich zur (subjektiven) Sicherheit. Die Sequenz B—R ist damit zu einer fest eingefahrenen oder »gebahnten« geworden. Dieser Mechanismus läßt sich in einem technischen System ohne große Schwierigkeiten nachbauen. Wird jede mögliche Reaktion z. B. durch einen bestimmten Schaltweg symbolisiert, in dem sich ein Widerstand befindet, dann läßt es sich so einrichten, daß in jedem Schaltweg, der zur erfolgreichen Reaktion führt, der Widerstand um ein geringes vermindert wird. Das nächste Mal wird der Strom den Weg des geringsten Widerstandes bevorzugen und dadurch den Widerstand weiter erniedrigen, bis die Beantwortung des auslösenden Reizes automatisch über diesen Schaltweg erfolgt. Die Maschine hat damit »gelernt«, daß auf den Reiz B die Reaktion R — und keine andere — zum Erfolg führt. An diesem Beispiel läßt sich erkennen, daß bereits mit wenigen Elementen Systeme aufgebaut werden können, die unerwartet vielseitige Eigenschaften besitzen.

Nun besteht das Gehirn des Menschen aus etwa zehn Milliarden Neuronen, zehn Milliarden winzigen Schaltelementen. Die kompliziertesten vom Menschen verfertigten Automaten bestehen aus etwa einer Million Elementen, also um vier Potenzen weniger als das Gehirn. Die leistungsfähigsten Rechenmaschinen haben tausend bis zehntausend

Schaltelemente, und es ist nicht wahrscheinlich, daß sich diese Zahl in absehbarer Zukunft wesentlich erhöhen wird. Wenn wir uns also vor Augen halten, daß in niederen Bereichen eine Verdopplung der beteiligten Elemente Systeme mit qualitativ ganz neuartigen Verhaltensweisen entstehen läßt, so müssen wir zugeben, daß der Unterschied im Grad der Komplexität zwischen Maschinen und Gehirn, ein Unterschied von minimal  $10^4$ , meistens aber  $10^6$ — $10^7$  Elementen (und dem dazugehörigen Schaltnetz), verantwortlich für das um vieles komplexere Verhalten des Gehirns sein mag. Wir haben a priori gar keine Möglichkeit, abzuschätzen, was für eine Wirkung die Erhöhung des Grades der Komplexität um  $10^6$  Schaltelemente auf den Charakter eines Systems haben könnte. Auf der einen Seite steht die Einfügung neuer Elemente, das Anlegen neuer Schaltungen, auf der anderen das Entstehen neuer Verhaltensweisen. Die Beziehung zwischen diesen beiden Seiten: der materialen und der phänomenalen, ist noch einsichtig in Systemen, die aus wenigen Elementen bestehen. Man kann z. B. voraussagen, was für eine Bedeutung der Schritt von zwei zu drei Elementen für die Eigenschaften einer Maschine haben wird. Doch ist es wahrscheinlich, daß dieser Voraussagbarkeit Grenzen gesetzt sind, daß es in sehr komplexen Systemen keine einfache logische, also deduzierbare Beziehung mehr zwischen dem materialen Komplex der Schaltelemente und den Eigenschaften des Systems gibt. Hier kann dann das Unerwartetste geschehen. Eine Erhöhung der Komplexität kann eine qualitative Veränderung des Systems von ungeahnten Ausmaßen mit sich führen. So nimmt man im allgemeinen an, daß die Leistungen einer Maschine weniger kompliziert sind als die Maschine selbst. Dies leuchtet besonders ein, wenn eine Maschine so eingerichtet ist, daß sie eine andere Maschine konstruieren kann. Der Schritt vom Erzeuger zum Erzeugnis ist mit einer Verringerung der Komplexität (oder des »Gehalts an Information«) verbunden, da ja die eine Maschine eines genauen Programms bedarf, um die andere Maschine herzustellen. Erzeuger + Programm sind aber augenscheinlich komplexer als das Erzeugnis allein. Dies war zumindest die allgemeine Auffassung bis vor kurzem. Nun hat aber der geniale Mathematiker John v. Neumann (1950) gezeigt, daß eine »Degeneration der Komplexität« nicht denknotwendig sei. Sie trifft nur für Maschinen bis zu einem bestimmten Grad der Komplexität zu. Ab diesem Grad sind Maschinen denkbar, die sich selbst oder sogar noch kompliziertere Systeme, als sie selbst sind, reproduzieren können.

Immer wieder kommen wir also auf den Begriff der Komplexität zurück. Wir ahnen, daß hochkomplizierte Systeme voller Überraschungen sind, in keiner Weise deduzierbar aus den Eigenschaften einfacherer Systeme. Die quantitative Vermehrung von Elementen und Schaltungen hat qualitative Änderungen größten Ausmaßes zur Folge. Wir bewegen uns hier am Rande einer Logik und Philosophie, die noch völliges Neuland darstellen; einer Logik, in der Verhaltensweisen und Eigenschaften nicht mehr beschrieben werden können, sondern selbst ihre eigene einfachste Beschreibung sind; einer Philosophie, in der »Form« und »Organisation« jene zentrale Stellung einnehmen, die in älteren Philosophien »Kraft« und »Stoff« zukam und in der das Gesetz von der »negativen Entropie« komplexer Systeme dieselbe Rolle zu spielen beginnt wie das Entropiegesetz Boltzmanns in den Spekulationen der Naturphilosophen zu Beginn dieses Jahrhunderts.