

ulm 6

Abraham A. Moles

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Strukturelle Komplexität lässt sich mit der Frage „Aus was besteht ein Gegenstand?“ ergründen. Funktionelle Komplexität erfahren wir durch die Frage nach dem „Wozu dient ein Gegenstand“. Objekte, die erforscht, verstanden, und sogar „gelesen“ werden wollen, kann man mit der Informationstheorie ergründen. Sich der Komplexität eines Gegenstandes bewusst sein und seine Strukturen zu erfahren bedeutet, ihn zu verstehen.

Copyright:

Es ist gestattet, digitale und gedruckte Kopien von Teilen oder des gesamten Textes fuer persönlichen Gebrauch oder fuer Unterrichtszwecke anzufertigen unter der Voraussetzung, dass die Dokumente nicht zur Erzielung eines finanziellen Gewinns oder fuer direkt kommerzielle Zwecke verteilt werden und dass Kopien diesen Hinweis zusammen mit der vollen Quellenangabe auf der ersten Seite oder dem ersten Screen anzeigen. Autorenrechte fuer Teile dieser Arbeit, die anderen Verfassern zustehen, muessen beachtet werden.

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

„Wer nur analysiert, verliert die Weit.“ Ernst Bloch

Um die Welt zu fassen, müssen wir sie erfassen. Um sie zu erfassen, müssen wir sie zunächst strukturieren. Es gibt indessen nicht Strukturen an sich, sondern nur wahrgenommene Strukturen. Die Wissenschaft als wesentliche Form des Weltverständnisses liefert uns zugleich Maße und Formen für diese Strukturierung.

Struktur

Die Kybernetik stellt sich dar als eine allgemeine Wissenschaft von den Organismen, unabhängig von der Art der Organe, aus denen diese Organismen bestehen. Sie will die Eigenschaften feststellen, die sich aus der Verbindung der Organe ergeben, feststellen, inwiefern und in welchem Maße das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile. Diese Frage richtet sich auf zwei Aspekte: den qualitativen und den quantitativ-en. Der erste ist von Anfang an bearbeitet worden. Die Kybernetik entwickelte sich sehr schnell zu einem Herstellungssystem von Strukturen, zu einer theoretischen Wissenschaft, die über den physikalischen Inhalt der von ihr untersuchten Elemente hinausgreift. Ihre eigentliche Anstrengung soll sich jedoch nach einer theoretischen Phase, auf die Erforschung autonomer Dimensionen richten.

Kybernetik

Die Wissenschaft von den Organismen verlangt insbesondere ein Ordnen der Organismen. Damit taucht zum ersten Male der Begriff der Quantität auf; denn das Ordnen impliziert die Definition eines Kontinuums. Die Verfahren des Ordners sind die Statistik – sie versucht, durch Sammlung von Einzelfällen Durchschnittswerte zu ermitteln – und weiterhin die eide-tische Reduktion, die ein bestimmtes Objekt auf den gemeinsamen Nenner seiner Aspekte und Funktionen zurückführt, um daraus eine Form zu destillieren.

Reduktion:

Verminderung der Redundanz einer Nachricht.

Unser Interesse gilt einer Metrologie der Organismen. Wir gehen aus vom Parallelismus zwischen Nachrichten und Organismen, den die Kybernetik festlegte und der durch die Kommunikationstheorie quantitativ erfassbar wird. Die Theorie beruht auf dem Konzept des Maßes einer charakteristischen Quantität, nämlich der 'Information', die allen Nachrichten gemein ist und die deren Originalität darstellt, verbunden mit der Unvorhersehbarkeit der Anordnung von 'Symbolen', welche die Nachricht bilden. Sie gründet sich also auf den Originalitätswert, der besagt: was vorhersehbar ist, ist nicht originell. Weiterhin beruht sie auf der Tatsache, dass der Schutz der Nachricht gegen störende Einflüsse der Außenwelt auf den Kommunikationskanal (Rauschen) durch die Redundanz gemessen wird, eine Größe, die der Information gegenübersteht und die den relativen Überschuss an Symbolen der Nachricht darstellt, verglichen mit der

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Anzahl, die tatsächlich notwendig gewesen wäre (Optimal-Kodierung). Die Redundanz gibt also das Maß der Symbolverschwendung an, das die Vorhersehbarkeit der Nachricht erhöht, jedoch die Informations- oder Originalitätsdichte vermindert. Die Redundanz vergrößert die Banalität, schützt die Nachricht gegen Störungen (Parasiten) und ermöglicht es, sie aus ihren Fragmenten und wahrscheinlichen Verknüpfungen wiederherzustellen (Entzifferung). Zugleich erhöht sie die Verständlichkeit, die also in gleicher Weise variiert wie die Redundanz.

Redundanz:

vergrößert die Banalität einer Nachricht

Die Verständlichkeit ist mit der Wahrnehmung von Formen verbunden. Der Begriff der Form selbst leitet sich für den Kybernetiker direkt aus der Redundanz einer ihn erreichenden Nachricht, d. h. aus dem Überschuss an Zeichen oder Elementen über die minimale Anzahl derer hinaus, die genügt hätte, um die gleiche 'Quantität an Originalität' aufrechtzuerhalten. Die Informationstheorie ist also eine Strukturtheorie, denn das Wort 'Struktur' bedeutet letztlich 'geistige Form' ("forme mentale"), die der Geist auf das Wirkliche projiziert. Das philosophische Problem der Strukturen entspringt einer statistischen Untersuchung der Situationen; denn die Wissenschaft – im Gefolge der Philosophie beschäftigt sich nur mit dem Allgemeinen. Eine Wissenschaft der Situationen beginnt mit dem Studium der kommunikativen Beziehungen. Sie versucht, diese von einem allgemeinen Standpunkt aus zu erforschen.

Informationstheorie =
Strukturtheorie

Einer der von der Kybernetik vorgeschlagenen Wege besteht darin, die Kommunikationsketten auf den Empfang von Nachrichten auszudehnen, die uns von der Außenwelt selbst her erreichen. Schon Husserl sagte, dass die Philosophie eine Entzifferung der Welt sei. Die Spieltheorie deutet, sich anlehnend an T. H. Huxley, darauf hin, dass der Experimentator die Natur als den aktiven unsichtbaren Partner eines Spiels in großem Maßstab betrachten kann, eines Partners, der sich uns mitteilt: "Nehmen wir an", schrieb Huxley, "es stehe fest, das Leben und Glück eines jeden von uns sollten an diesem oder jenem Tag von einer Schachpartie abhängen. Müssten wir es dann nicht als unsere Pflicht betrachten, wenigstens die Namen der Spielfiguren und ihre Bewegungen zu lernen?... Leben, Reichtum und Glück eines jeden von uns hängen also von unserer Kenntnis der Regeln eines Spiels ab, das unendlich viel schwieriger und komplizierter ist als das Schachspiel... Das Schachbrett ist die Welt, die Figuren sind die Phänomene der Welt, die Spielregeln das, was wir die Naturgesetze nennen. Der Gegner ist unsichtbar. Wir wissen, dass er gut spielt, niemals falsch spielt und unerschöpfliche Geduld hat. Wir wissen aber auch, dass er niemals einen Fehler verzeiht und Unwissenheit nie entschuldigt."

Thomas Henry Huxley:

*4.5.1852 – † 29.6.1895

unterstützte und erweiterte Theorien Darwins, und dehnte dessen Abstammungslehre auf den Menschen aus, sorgte für Popularisierung der Wissenschaft

Diese Auffassung von der Außenwelt als eines Gegners in einem großen

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Spiel, das bestimmten genauen Spielregeln unterworfen ist und das gegen den Philosophen oder den Gelehrten geführt wird, stimmt mit der informationstheoretischen Auffassung überein, die in der Situation des Experimentators den Zug eines Spiels sieht, gekennzeichnet durch die sukzessiven 'Hinweise', die ihm der Gegner gibt. Um diese Haltung noch mehr zu präzisieren, können wir das Individuum als Gefangenen in einer Glaskugel auffassen, auf welche die Nachrichten der Umwelt projiziert werden. Die Umwelt fungiert als Informationsquelle. So entsteht eine 'Wissenschaft der Umwelt', wie sie von Uexküll vorgeschlagen hat.

Die Umwelt erscheint dem Kybernetiker also als ein unendlich großes Ensemble von Organismen. Wir wissen, dass die 'eidetische Reduktion' leichter zu erreichen ist bei Artefakten; denn wir können eher deren nicht wieder aufhebbare Verfremdung prüfen. Somit werden wir, vor dem Versuch, ein Metrum auf die Gesamtheit der natürlichen Organismen anzuwenden, uns zunächst auf künstliche Organismen beschränken, auf Maschinen im weitesten Sinne des Wortes.

eidetische Reduktion

Künstliche Organismen, Maschinen

Der Ausdruck 'Maschine' wird allgemein nur aus der Gegenüberstellung von Mensch und Maschine verstanden, d. h. aus der Absonderung der Operationen, welche die Maschine an Stelle des Menschen ausführt. Die Bedeutung des Wortes 'Maschine' ist vor allem eine dynamische und soziologische. Sie wird nur in einem bestimmten Augenblick der technologischen Entwicklung deutlich: der Hebel gehört schon lange nicht mehr zur Maschinenwelt, die Automatenwaage hingegen immer noch. Die technischen Gegenstände sind als Klasse außerhalb des Individuums und der belebten Welt sowie als Resultat der menschlichen Arbeit mehrfach definiert worden. Diese Definitionen sind zahlreich genug, um eine Gruppierung zu rechtfertigen. Man kann sie nach zwei Kriterien ordnen:

1. die analytischen oder strukturellen Definitionen: Elemente in verständlicher Anordnung.
2. die teleologischen oder funktionellen Definitionen: Systeme mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen.

1. strukturelle Definition:

„Die Maschine besteht aus.“

2. funktionelle Definition:

„Die Maschine dient zu.“

Das Kind, der Eingeborene, der Erfinder, der Verbraucher definieren den Gegenstand durch die Funktion: "Dient zu". Der Mathematiker, der Philosoph, der Konstrukteur definieren den Gegenstand durch die Struktur: "Die Maschine besteht aus". Sie ordnen die Aktionen der verschiedenen Elemente in einzelne Funktionsgruppen, die sich ineinander verschachteln, um ein gesetztes Ziel zu erreichen. Sie stellen eine verständliche Hierarchie der einzelnen Strukturen auf, die das schematische Diagramm der Maschine, nämlich das funktionelle Schema abgibt. Somit können wir unterscheiden:

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Im Falle der Maschinen, soweit sie als hergestellte Gegenstände betrachtet werden, leitet sich die Idee der Quantität also aus den vorangegangenen Bemerkungen her: Wenn eine Maschine eine Struktur ist, dann ist das Verstehen dieser Maschine gleich dem Wahrnehmen ihrer Struktur.

Struktur

Die Komplexität ist somit die einzige universale Dimension für eine Struktur, wobei die qualitativen Eigenschaften und die Anordnung ihrer Organe nicht berücksichtigt werden. Ein Maß der Komplexität wird also eine universale Dimension im vorher erwähnten Sinne mit sich bringen. Es sollte hier jedoch von vornherein zwischen Komplexität und Komplikation (Verwicklung) unterschieden werden. In einem verwickelten System sind eine mehr oder weniger große Zahl von ganz verschiedenen Organen angeordnet. Man muss also zuerst jedes einzelne dieser Organe auf seine Eigenschaften hin untersuchen, um diese Organe dann in den Zusammenhang ihrer Wechselbeziehungen zu stellen. Wir wissen, dass der Mensch diesen Zusammenhang nicht mehr überblicken kann, sobald ihre Anzahl ein wenig anwächst.

Komplexität

Dagegen ist ein System zusammengesetzt ohne deshalb verwickelt sein zu müssen wenn es aus einer großen Anzahl gleichartiger Elemente besteht oder wenn sie zu einer sehr begrenzten Anzahl von verschiedenen Klassen gehören und alle auf gleiche Weise verknüpft sind. In diesem Sinne ist eine Telefonzentrale zusammengesetzt; denn sie ist ein Schaltgefüge einer sehr großen Zahl von ähnlichen elementaren Stromkreisen. Der Mensch kann ein zusammengesetztes System assimilieren; denn er kann die Struktur begreifen, unabhängig von den Elementen, aus denen sie besteht, sei es, dass diese wenig verwickelt sind, oder sei es, dass man die Untersuchung Spezialisten überlässt.

Wenn man die Maschine – oder den Organismus – als eine Nachricht betrachtet, welche die Außenwelt dem Beobachter zukommen lässt, dann kann man die Informationstheorie heranziehen, die es sich ja gerade zum Ziel gesetzt hat, unter dem Namen 'Information' die Komplexität KO einer aus N Elementen zusammengesetzten Nachricht zu messen, die einem Repertoire von n Symbolen Mächtigkeit entnommen sind und mit einer Häufigkeit für das n-te Symbol auftreten. Dadurch gewinnt man ein objektives Maß für die Komplexität der Maschinenformen. Das 'Repertoire' ist also der Katalog der Einzelteile, die zum Bau der Maschine dienen. Die Maschine wird gebildet, indem man P₁ Organe der Klasse 1, P₂ Organe der Klasse 2 und... P_n Organe der Klasse n auswählt und zusammenfügt.

Maschine als Nachricht

So, wie der Katalog dem Alphabet eines gedruckten Textes entspricht, wird man mit dem Setzkasten das Magazin der Einzelteile gleichsetzen. Eine Registrierkasse besteht also aus: 30 Gewindeschrauben S. 1. 60-80,

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

40 mm lang; 250 Gewindeschrauben S. 1. 3-60; 200 Hebeln vom Typ A; 10 Ziffernrädern; 100 vernickelten Tasten; 4 Gummifüßen; 1 gusseisernem Gestell, Modell P2 USW. Jedes dieser Teile kann natürlich seinerseits für den Herstellungsbetrieb in eine bestimmte Zahl von einfachen Elementen zerlegt werden, entsprechend der Hierarchie der Ebenen.

Kurz gesagt: Die shannonsche Fundamentalformel der Information kann auf das Messen der strukturellen Komplexität übertragen werden, da sie nur ein einfacher mathematischer Ausdruck des Grades der Unvorhersehbarkeit einer Zeichenfolge ist. Man schreibt: Strukturelle Komplexität:

$$KO_s = -N \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

wobei i die Anzahl der Teile ist und p_i die relative Verwendungshäufigkeit der Elemente, die in einem gegebenen Ensemble von Maschinen vorkommen.

Dieses Maß der Komplexität entspricht unter anderem dem vorher entwickelten Begriff der Hierarchie der Ebenen und den rationellen Grundkriterien der shannonschen Theorie. Die Komplexität variiert mit der Anzahl der Elemente, aber nicht linear; sie variiert vor allem mit deren Varietät und mit der relativen Häufigkeit ihrer Verbindung.

Die shannonsche Formel, die sich auf ungleiche Ereigniswahrscheinlichkeiten bezieht, übersteigt die für eine mechanologische Beweisführung geforderte Präzision. Ein genügender Näherungswert der strukturellen Komplexität wird in der Praxis durch den vereinfachten Ausdruck $KO_s = K \log N$ erreicht, wobei N die Menge von Elementen einer Struktur ist. Die Elemente selbst werden dabei nicht unterschieden. Dieser Näherungswert ist nützlich bei der praktischen Arbeit, wo die Schemata, die sogenannten Blockdiagramme angewandt werden, wie z. B. in der Elektronik. Er trifft in gleicher Weise zu auf eine Drehbank, eine Fräsmaschine oder auf einen Kraftwagen bei welchen Maschinen die Varietät der Organe relativ hoch ist – verwickelte Maschinen im oben definierten Sinne des Wortes. Er würde weniger genügen bei einem Handwebstuhl, einer Telefonzentrale oder einer Rechenmaschine, da man bei diesen Organismen eine sehr große Anzahl von identischen Organen findet, wodurch die kombinatorische Unvorhersehbarkeit und das Ensemble reduziert werden. In diesen Fällen sollte man die oben gegebene vollständige und genauere Formel anwenden.

Untersuchen wir nun die zweite 'Definition', die wir oben vorgeschlagen haben: die funktionelle Definition oder die funktionelle Beschreibung der

shannonsche Formel:

nach Claude Elwood Shannon,

*30.04.1916

amerik. Mathematiker, Begründer der Informationstheorie, leistete bahnbrechende Arbeiten für die Grundlagen der Programmierung von Computern

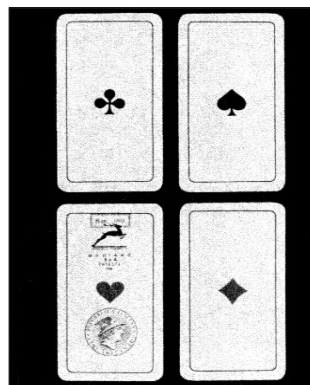
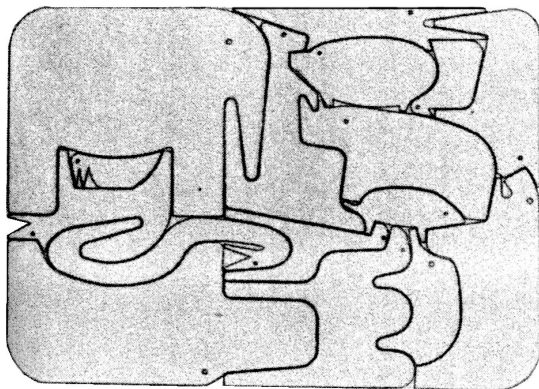
ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Organismen, basierend auf der Antwort "dient zu". Auch hier sind die Verwendungsarten eines Mechanismus im allgemeinen sehr verschieden. So enthält eine Schreibmaschine eine ziemlich große Anzahl von Freiheitsgraden: Drehen der Walze, Verstellen des Wagens, Einstellen des Randstellers, Anschlagen einer der 40 Tasten, Herausnehmen des Papiers, usw.

Das Ensemble dieser Freiheitsgrade wird nur eingeschränkt durch das Axiom 'Gebrauch ist nicht Zerstörung', folglich durch die Existenz von normalen 'funktionellen Grenzen', die fast immer hinreichend genau festgelegt sind im Hinblick auf den Gebrauch und die aus diesen Freiheitsgraden herleitbaren Gebrauchsverbindungen. Wenn man also das Papier auf die rechte Seite zieht, ohne die Walze gelöst zu haben, fällt das nicht unter den Begriff des Freiheitsgrades, weil man dabei Gefahr läuft, das Papier zu zerreißen oder den Papierhaltemechanismus zu beschädigen. Jeder Gebrauch wird sich also statistisch als Handlungsfolge darstel-



<< Tierbaukasten ('puzzle')

Niedriger Grad von funktioneller Komplexität verbunden mit relativ hohem Grad an struktureller Komplexität
Design: Enzo Mar (1957)

< Kartenspiel

Niedriger Grad von struktureller Komplexität verbunden mit relativ hohem Grad an funktioneller Komplexität

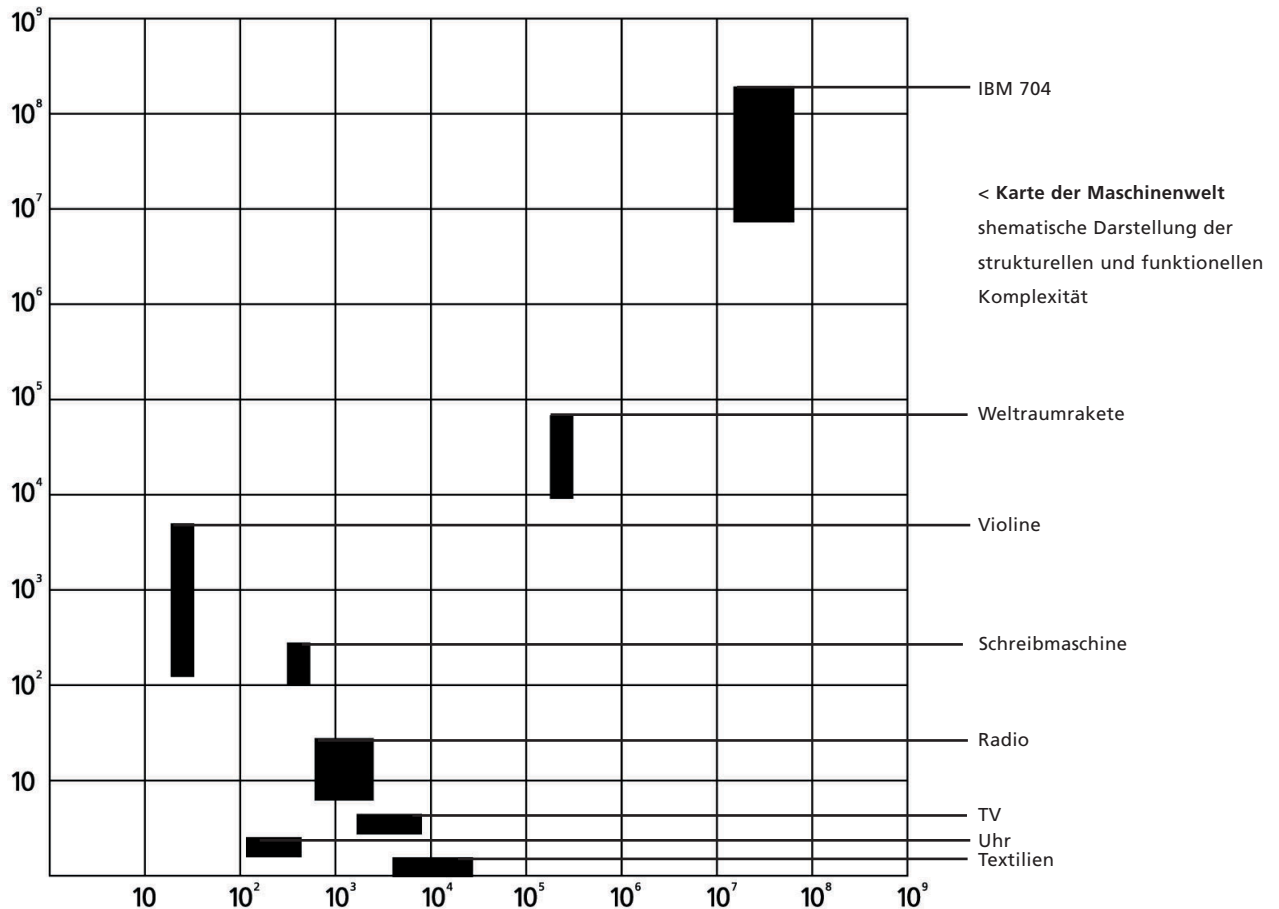
len. Er bringt die verschiedenen Freiheitsgrade ins Spiel, Manipulationen, die in jeder speziellen Folge mit verschiedener Häufigkeit auftreten, statistisch aber konstant sind. So wird eine Sekretärin die einen französischen Text schreibt, häufiger den Buchstaben 'e' als den Buchstaben 'z' anschlagen, und zwar wahrscheinlich zwanzig mal öfter – eine Tatsache, welche die Hersteller der Maschinen in Rechnung stellen müssen.

Die Betrachtung eines künstlichen Organismus legt den Gedanken einer Demographie der Operationen nahe, einer Statistik von Gebrauchsfrequenzen der Freiheitsgrade in einem gegebenen Zeitabschnitt, den Gedanken einer funktionellen Komplexität, einer Originalität bzw. mehr oder weniger großen Banalität der Handlungsfolgen in die man jeden Operationsprozess zerlegen kann.

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität



Somit verfügen wir nun für jede Gruppe von funktionellen und strukturellen Definitionen, die wir zu Anfang für die Produkte der technischen Zivilisation herangezogen haben, über zwei unabhängige Dimensionen und Maße gleicher Art: die funktionelle Komplexität und die strukturelle Komplexität. Diesen metrologischen Algorithmus kann man leicht auf jede Art der Organismen anwenden, seien sie natürlich oder künstlich, und zwar in dem Maße, wie man Bausteine unterscheiden kann: biologische Zellen, physikalische Atome, chemische Symbole, berufliche Kategorien eines Betriebes, psychologische Typen der Soziometrie usw.

Diese beiden Dimensionen liefern die Koordinaten für eine Karte der Maschinenwelt. Man kann diese Karte anlegen, indem man bestimmte typische Organismen des technologischen Eroberungszuges auf ihr einträgt: das Kartenspiel hat eine sehr große funktionelle Komplexität bei einer relativ kleinen strukturellen Komplexität; es unterscheidet sich z. B. stark von dem Legespiel ('puzzle'), dessen großer Varietät von Teilen oft nur eine einzige (nicht-destruktive) Gebrauchsart beigegeben ist. Die

ulm 6

Abraham A. Moles:

Produkte: ihre funktionelle und strukturelle Komplexität

Schreibmaschine mit 1000 Elementen, der Fernsehapparat (3000 Elemente), die Weltraumrakete (300000 Elemente), die IBM-Rechenanlage (20000000 Elemente) stecken das Feld der technologischen Errungenschaften ab. Sie weisen aber auch auf die Schwierigkeiten hin. Es zeigt sich z. B., dass die Wahrscheinlichkeit eines Defektes mehr mit der strukturellen Komplexität als mit der absoluten Zahl der Bestandteile zusammenhängt.

Defekte

Wenn man solche Karten anlegt, stellt man fest, dass es keine absolute statistische Unabhängigkeit zwischen den beiden Dimensionen gibt: viele vom Menschen entworfene Vorrichtungen tendieren dahin, sich um eine Regressionslinie zu gruppieren, was besagt, dass die Komplexität der geforderten Funktionen wächst. Auf einer derartigen Karte dem ersten Ausdruck einer eigens kybernetischen Quantität - erkennt man auch die verhältnismäßig deutlich abgegrenzten Leerzonen, deren Existenz der Philosophie der Organismen ein Problem aufgibt. In dieser Hinsicht beruht die Beziehung zwischen Funktion und Struktur, zwischen Zielen und Mitteln, auf einer Dialektik zwischen Nullaufwand und Minimalaufwand, die der Heuristik eine neue Perspektive eröffnen kann.

< Dieser Artikel, von dem hier Auszüge mit Genehmigung des Verfassers veröffentlicht sind, ist unter dem Titel 'La Notion de Quantité en Cybernétique' in der Zeitschrift 'Les Etudes Philosophiques' Nr. 2, April -Juni 1961, erschienen.