

Das Problem der Bestimmtheit und Unbestimmtheit in komplexen Systemen

Autor(en): **Wieser, Wolfgang**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **15 (1961)**

Heft 1

PDF erstellt am: **05.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-330678>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Das Problem der Bestimmtheit und Unbestimmtheit in komplexen Systemen

Dieser dritte Aufsatz von Wolfgang Wieser handelt wiederum nicht von Architektur, sondern von Organen und Maschinen. Er enthält aber wiederum eine Fülle von Gedanken und Forschungsergebnissen, die in einer sinn-gemäßen »Übersetzung« auch auf Fabrikations- und Bauvorgänge, vor allem aber auf das Organhafte in der Architektur übertragen werden können. Vgl. Bauen + Wohnen Nr. 11/1960, Seite 399 f und Nr. 12/1960, Seite 435 f und Konrad Wachsmann, Studium im Team, Heft 10/1960.

Wenn es jemals einen wissenschaftlichen Satz gab, dem der Rang eines Dogmas verliehen wurde, dann den Satz von der letzten Determination und Determinierbarkeit aller natürlichen Prozesse, wie er im 18. und 19. Jahrhundert aufgefaßt wurde. Der Laplace'sche Weltgeist ist nichts anderes als der Ausdruck dieser dogmatischen Überzeugung: Wären uns alle Zustände der Welt zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann würden wir in der Lage sein, sämtliche Zustände der Welt zu jedem Zeitpunkt in der Zukunft vorauszusagen. Von Anfang an war man bereit, zuzugeben, daß niemand in die Lage des Laplace'schen Weltgeistes kommen würde, da wir eben nie alle Zustände der Welt erfahren könnten, aber im Prinzip wurde an der Determinierbarkeit der Welt nicht gezweifelt. In den letzten 50 Jahren ist nun ein neues Argument gegen die Existenzmöglichkeit des Laplace'schen Geistes aufgetaucht, und zwar, daß wir, selbst wenn alle Zustände der Welt zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt wären, noch immer nicht die Zukunft voraussagen könnten. Diese Änderung der Kritik am Laplace'schen Dogma stellt nicht mehr noch weniger als eine intellektuelle Revolution dar, die bekanntlich von der Physik in Gang gesetzt worden ist. Nach Auffassung der modernen Physik können wir nie den Ort genau angeben, an dem sich ein Partikel zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden wird, sondern immer nur den Grad der Wahrscheinlichkeit, unter dem es an diesem oder jenem Ort vorgefunden werden kann. Die eindeutig determinierten Gesetze der klassischen Physik sind also durch Wahrscheinlichkeitsgesetze ersetzt worden. Doch läßt auch die moderne Physik zwei verschiedene Interpretationen dieses Sachverhaltes zu. Einmal wird der Standpunkt eingenommen, daß die Elementarkonstanten der Welt aus prinzipiellen Gründen nicht mit absoluter Genauigkeit meßbar sind. Dies ist die Quintessenz der Heisenberg-Relation, die aussagt, daß sich Ort und Impuls eines Elementarpartikels nicht gleichzeitig und exakt bestimmen lassen. Hier handelt es sich aber um nichts anderes als um das alte Argument gegen den Laplace'schen Geist, daß die Zustände der Welt nie

in ihrer Totalität erfahrbar sind — wenn auch in einem quantenphysikalischen Gewand. Die zweite Interpretation ist die schon oben gegebene: Selbst wenn Ort und Impuls aller Elementarpartikeln gleichzeitig und exakt bestimmbar wären, so würden sich daraus noch immer nicht die zukünftigen Zustände dieser Partikeln ableiten lassen. Während die Heisenbergsche Interpretation der Wahrscheinlichkeitsgesetze auf der — allerdings prinzipiellen und endgültigen — Unvollkommenheit unserer Beobachtungsmöglichkeit ruht, so impliziert die zweite Interpretation, daß das Element der Wahrscheinlichkeit, der Nichtvoraussagbarkeit, in der Natur der Dinge und nicht in der Beobachtung liegt. Vom Standpunkt einer pragmatischen Wissenschaft ist die Unterscheidung zwischen diesen beiden Interpretationen unwichtig; die Konstanten, auf die es ankommt, sind eben nicht meßbar, und die Heisenbergsche Unschärferelation macht durch ihre Endgültigkeit jeden Versuch zunichte, über sie hinaus zu einer tieferen Erfassung des Prinzips der Wahrscheinlichkeit im subatomaren Bereich zu gelangen. Ich möchte jedoch im folgenden zeigen, daß — unabhängig davon, wie man nun die Existenz von Wahrscheinlichkeitsgesetzen in der Welt interpretiert — dieselben Probleme nicht bloß in der Physik, sondern auch in der Biologie eine Rolle spielen. Damit sei nur gesagt, daß das Problem der Indetermination, Wahrscheinlichkeit und statistischen Ordnung auch in der Biologie zu Hause ist, und nicht, daß es in derselben Gestalt wie in der Physik auftritt. Es gewinnt ja die Anschauung Kontur, daß auf jeder Ebene der Wirklichkeit, der physikalischen, biologischen und soziologischen, eine Klasse analoger Probleme existiert — aber auf jeder Ebene in ganz spezifischem Gewand. Dies zu übersehen, die Analogien nicht als formale, sondern als inhaltliche aufzufassen, führt zu absurden Behauptungen, wie z. B., daß der freie Wille nichts anderes als die Wirkung der Indetermination der Atome auf das Nervensystem sei. In einem einfachen System wie dem Thermostat ist alles festgelegt. Für praktische Zwecke determiniert jeder Zustand den folgenden. Wenn wir in das System eingreifen und es stören, so wird es entweder zusammenbrechen oder mit einer Reaktion antworten, deren Verlauf, Bahn und Größe exakt voraussagbar sind. Diese Tatsache der Determinierbarkeit ist zweifellos die Grundvoraussetzung für die meisten Maschinen, die wir kennen. Ein Auto, das auf einen bestimmten Handgriff nicht mit einer ganz bestimmten, voraussagbaren Leistung antworten würde, wäre wertlos.

Bis vor kurzem gab es keine Ursache, anzunehmen, daß dieses Prinzip der absoluten Determinierbarkeit in der Technik durch etwas anderes ersetzt — oder ergänzt — werden müßte. Diese Lage hat sich jedoch in letzter Zeit entscheidend geändert. Es wurde erkannt, daß sich als ein — nichtkonstruktives — Element das Prinzip der Unbestimmtheit bereits in allen Maschinen befindet. Das minutiöse »Spiel« einer Achse in ihrem Lager oder das Geräusch in Elektronenröhren und Leitungen, das den Gehalt einer Nachricht zu verstümmeln droht, ist nichts anderes als ein indeterminiertes »zufälliges« Element, da es aus dem Zustand des Systems in einem gegebenen Moment nicht genau zu erschließen ist. Aber auch als ein konstruktives Element begann die Unvorhersagbarkeit von Ereignissen in der Technik eine Rolle zu spielen. Dies vor allem, als Techniker und Physiologen anfangen, Maschinen zu bauen, die die Leistungen und Eigenschaften von

Lebewesen imitieren sollten. Will man mit einer Maschine ein Lebewesen imitieren, so taucht die Frage auf, ob das Prinzip der absoluten Determinierbarkeit auch auf dieses zutrefte — und, wenn nicht, ob und wie das Gegenteil davon in einer Maschine nachgebaut werden könnte. Ross Ashby wies nun überzeugend nach, 1. daß gewisse Verhaltensweisen von Lebewesen den Eindruck machen, als ob es in ihren Steuerungszentren ein indeterminiertes Element gäbe, 2. daß das Prinzip der Indetermination in Maschinen nachgebaut werden kann. Ashbys Homöostat enthält so ein indeterminiertes oder »zufälliges« Element, das den Apparat in besonderer Weise zu einer Analogie der ultrastabilen Anpassungsfähigkeit von Lebewesen macht. Es zeigte sich, daß ein Apparat selbst dann, wenn ein Teil seiner Leitungen nicht nach genauen Spezifikationen, sondern regellos angelegt ist, in einer raschen Folge kleiner Schritte, gleichsam mittels einer Versuch-und-Irrtum-Methode, seinen inneren Zustand als Reaktion auf selbst unvorhergesehene Störungen zu stabilisieren strebt. Dieser Behauptung müssen jedoch gewisse Erläuterungen hinzugefügt werden, um dem Prinzip seinen richtigen Platz zuzuweisen. Ein Großteil des Schaltnetzes im Homöostaten ist genau determiniert — variabel, wie ein Rückkopplungssystem eben ist, aber doch genau determiniert. Wird einer der Magneten aus seiner zentralen Position gebracht, dann erzeugt diese Störung einen Strom, der über ein geschlossenes Leitungssystem mit Röhre, Widerstand und Relais derartig geschaltet ist, daß seine Spannung proportional der Abweichung des Magneten ist. Der Strom gelangt über Spulen und Unterbrecher wieder in den Magneten, den er durch Beeinflussung seines Drehmoments zurück in die Ruhestellung zu ziehen trachtet. Dies spielt sich innerhalb eines Systems ab, das determiniert und in keiner Weise verschieden von dem anderer Apparate mit Rückkopplung ist. Quantitativ macht es den Hauptbestandteil des Homöostaten aus. Der entscheidende Punkt ist nun folgender: Überschreitet die Abweichung des Magneten einen kritischen Wert, dann wird der schon erwähnte Stufenschalter in Gang gesetzt.

Das Ingangsetzen dieses Schalters ist noch immer ein genau determinierter Akt. Die Werte, auf die sich der Schalter einstellen kann, sind jedoch dem Zufall überlassen, oder, um etwas genauer zu sein, die Leitungen innerhalb des Schalters folgen nicht einem bestimmten, durch die Funktion des ganzen Systems gegebenen Plan, sondern sind aufs Geratewohl angelegt. Diese Regellosigkeit kann auf verschiedene Art und Weise erreicht werden. Man kann sich beliebige Zahlen einfallen und die Reihenfolge der Schalterwerte der Reihenfolge dieser Zahlen entsprechen lassen, oder man würfelt die Werte, oder man schlägt sie in den Tafeln für »random numbers« von Fisher und Yates nach (diese Methode hat Ashby gewählt). Das Gesamtsystem besteht nun aus zwei Teilen: dem determinierten, der die meisten Elemente des Systems miteinander verbindet, und dem indeterminierten, der in kritischen Zuständen aufs Geratewohl aus einem großen Vorrat von Parameter-Werten jenen Wert wählt, der dem System wieder Stabilität verleiht. Im ersten Teil ist jeder Schritt durch den vorangehenden genau bestimmt, also voraussagbar, im zweiten ist nur das Ingangsetzen des Stufenschalters selbst bestimmt, während die darauffolgenden Reaktionen vom Zustand des Systems her (und ohne Kenntnis des Schaltplanes) nicht vorausgesagt werden können.

Man könnte nun noch einen Schritt über Ashbys Apparat hinausgehen und das »in-determinierte Element« nicht bloß durch ein aufs Geratewohl angelegtes Leitungsnetz (dessen Schaltplan sich ja auf irgendeine Weise bestimmen läßt) darstellen, sondern durch einen prinzipiell unvorhersagbaren, also unbestimmten Mechanismus. Es ließe sich z. B. an Stelle des Stufenschalters ein Rauschgenerator einbauen, dessen völlig regellose Impulse den Drehwähler und damit den Stabilisierungsmechanismus des Homöostaten betätigen und nach Umweltstörung auf kurz oder lang einen stabilen Zustand des Systems herbeiführen würden. Dadurch wäre gezeigt, daß auch ein völlig regelloser Mechanismus, wenn er nur in ein andererseits geregeltes System eingebaut ist, bei Störungen das System in stabile Zustände zurückzuführen imstande ist.

Die Existenz derartig zufälliger Mechanismen in Lebewesen ist durchaus wahrscheinlich. Es ist anzunehmen, daß sich in den komplexen Steuer- und Kommunikationszentren des Gehirns nicht alle nervösen Verbindungen in streng geregelter Weise herstellen, sondern daß dem Zufall beim Zustandekommen dieser Verbindungen ein weiter Spielraum gelassen ist. Dies würde ja anderen Erfahrungen im Bereich der Biologie entsprechen. So ist einer der entscheidendsten Faktoren der organischen Evolution: das Auftreten von Mutationen, ein ungerichteter, zufälliger Vorgang. Zumindest gilt dies für das ungeheuer große experimentelle Material, das in den letzten 40 Jahren von den Genetikern zusammengetragen worden ist. Und doch ist die Evolution der Organismen ein geordneter Vorgang. Wohlgerichtet, kein voraussagbarer, aber ein geordneter.

Diese Beschreibung gilt sowohl für den Prozeß der physiologischen Stabilisierung als auch für den der Evolution — wenn nur etwas verschieden schattierte Begriffe verwendet werden. In beiden Fällen ergibt ein regelloser Vorgang: das tastende Suchen physiologischer Prozesse oder die Zufälligkeit der Mutationen, einen geordneten Zustand, indem er sich einem inappellablen Kriterium unterstellt: dem Erfolg der gewählten Leistung oder der Lebensfähigkeit des mutierten Organismus. In dieser Chance des Zufalls, einen stabilen Zustand herbeizuführen, drückt sich das höchste Maß an Wahlfreiheit aus, dessen ein System fähig ist. Voraussetzung dieser Fähigkeit ist ein bereits ziemlich hoher Grad der Komplexität des Systems.

Wir müssen heute auf dem Standpunkt stehen, daß es prinzipiell unmöglich ist, das Schicksal eines Impulses, der in das Gehirn geschickt wird, genau vorauszusagen. Nicht nur, daß sich jeder Impuls auf so viele Schaltelemente verteilt und in das Netz von Schichten, Zentren und Bahnen auf so unglaublich komplizierte Weise hineinverwoben wird, daß die technischen Schwierigkeiten der Beobachtung unübersteigbar sind, sondern der Impuls hat auch die Wahl verschiedener Bahnen, und welche er im Moment t wählen wird, ist durch seinen Zustand im Moment $t-1$ nicht eindeutig determiniert. (Hier wird außerdem ganz von der Möglichkeit abgesehen, daß sich Impulse nicht bloß über nervöse Bahnen, sondern auch mittels elektrischer Felder fortpflanzen.) Wir können deshalb das Schicksal eines bestimmten Ereignisses im Nervensystem nicht genau voraussagen, und wir können Impulse im Gehirn nie genau lokalisieren, sondern nur den Grad der Wahrscheinlichkeit angeben, mit dem sie sich an einem bestimmten Ort befinden werden. In den Worten v. Bonins: »Punktförmiger kortikale Ereignisse werden

durch »Wahrscheinlichkeitsregionen« ersetzt, und die Geometrie kortikaler Ereignisse muß mittels einer statistischen Metrik analysiert werden.« Wie sich leicht sehen läßt, ist diese Situation der modernen Physik durchaus analog. Ich möchte nochmals betonen, daß diese Situation endgültig ist. Wir haben keinen Grund anzunehmen, daß ein Wahrscheinlichkeitsgesetz die Ordnung der Natur in geringere Maße oder weniger prinzipiell als ein Kausalgesetz ausdrückt, ja das Wahrscheinlichkeitsgesetz ist ein Kausalgesetz besonderer Art. J. Bronowski hat dies in seinem brillanten Essay »Science as Foresight« folgendermaßen formuliert: »Wir müssen annehmen, daß Wahrscheinlichkeit nicht bloß eine Fiktion ist, die sich von Generation zu Generation verringert, bis sie schließlich ganz verschwunden sein wird, sondern daß sie ein nicht wieder wegzudenkendes Element in der Formulierung wissenschaftlicher Gesetze ist.«

Dies entzieht gleichzeitig der Auffassung den Boden, daß Regellosigkeit, Indetermination und Nichtvorhersagbarkeit dem Begriff der Ordnung widersprächen. Der Widerspruch der Ordnung ist das Zerbrechen der Ordnung, nicht die Regellosigkeit komplexer Systeme. Diese ist vielmehr die Voraussetzung dafür, daß das Unerwartete und Neue in der Welt geschieht. Die Ordnung, mit der wir es hier zu tun haben, ist keine starre, unbewegliche, sondern eine wandelbare. Uns tritt sie entgegen als statistische Ordnung. Vom anderen Ende her gesehen erscheint sie uns als das Wahlvermögen der einzelnen Ereignisse innerhalb eines Systems. Die Indeterminiertheit der Elektronen, die Indeterminiertheit nervöser Impulse und wahrscheinlich auch die Indeterminiertheit menschlicher Handlungen innerhalb eines Gesellschaftssystems haben alle diesen zweifachen formalen Aspekt: den des Wahlvermögens und den der statistischen Ordnung. Je nachdem, von welchem Ende man eine Gruppe bestimmter Ereignisse betrachtet, steht einmal dieser, einmal jener Aspekt im Vordergrund.

Die Indeterminiertheit, die der künftigen Bahn eines nervösen Impulses anhaftet, bewegt sich natürlich in engen Grenzen. Sie folgt eben jener Ordnung, die uns erlaubt, wenn schon nicht exakte, so doch statistische Aussagen über künftige Zustände derartiger Systeme zu machen. Bildlich gesehen gleicht der Weg eines Impulses also nicht einer Linie, sondern einer breiteren Bahn oder einem Feld, wobei der Impuls innerhalb dieses Feldes beliebigen Linien folgen kann. Dieses »Wahrscheinlichkeitsfeld« mündet nun in strikter definierte motorische Bahnen, die die Kommando- und Assoziationszentren des Gehirns mit den Effektoren verbinden. Diese Verbindungen sind meist eindeutig determiniert, ebenso wie die meisten sensorischen Bahnen determiniert sind. Der Organismus in seiner Totalität baut sich also aus determinierten und indeterminierten Untersystemen auf. Dies hat zur Folge, daß wir voraussagen können, wie ein Organismus auf einen bestimmten Reiz reagieren wird, obwohl wir nicht voraussagen können, welchen Weg der Reizimpuls in den Steuerungscentren dieses Organismus im einzelnen nehmen wird. Dies erinnert uns wieder an die Situation in der Physik, wo es möglich ist, im Makrokosmos streng determinierte kausale Gesetze aufzustellen, obwohl sich diese auf den Wahrscheinlichkeitsgesetzen des Mikrokosmos gründen.

Von den sensorischen Bahnen ist die optische, die die Retina mit dem Sehzentrum im Großhirn verbindet, weitgehend determiniert. Viel diffuser und indeterminierter ist die Bahn zwischen Geruchsorgan und Riechzentrum.

Dringen wir tiefer in das Innere des Nervensystems ein, so gelangen wir zu den Assoziationszentren des Großhirns, die zusammen den Typus eines jener Systeme ausmachen, in deren unendlicher Verknüpfung die Determinierbarkeit von Ereignissen aufhört. Eine glänzende Illustration dieses Tatbestandes haben die Untersuchungen von Lashley (1950) über die Gedächtnisleistungen höherer Wirbeltiere geliefert. Lashley zeigte, daß selbst ausgedehnte Zerschneidungen von Assoziationsbahnen in der Gehirnrinde die Gedächtnisleistungen nur unbedeutend beeinflussten. Dies deutet darauf hin, daß Erfahrungen nicht nach einem starren Schlüssel gespeichert und weitergegeben werden, sondern in verschiedenster Weise und über verschiedenste Wege reaktivierbar sind. Erinnern wir uns daran, daß sich ein ultrastabiles System dadurch auszeichnet, daß es im Falle unerwarteter Störungen mittels unerwarteter Reaktionen seine Stabilität aufrechtzuerhalten strebt, so finden wir leicht eine Beziehung zwischen diesem Verhalten und dem des Großhirns, das trotz einer so unerwarteten Störung, wie sie die Zerschneidung von Assoziationsbahnen darstellt, die Stabilität seiner Reaktionen bewahrt.

Die nervösen Impulse, aus denen sich Gedächtnisinhalte zusammensetzen, sind nicht an genau definierte Bahnen gebunden, sondern die sie dominierende Struktur ist ihnen auf andere Art und Weise aufgeprägt. Fällt also eine bestimmte Bahn aus, so wird dasselbe Ergebnis auf anderem Weg erreicht werden, denn nicht dieser, sondern die Leistung, nicht die Identität von Leitungsbahnen, sondern die Identität von Verhaltensstrukturen bestimmen die Ordnung im Gehirn. Überlegen wir uns, was diese gegenseitige Durchdringung des deterministischen und des indeterministischen Prinzips für den Konstrukteur eines Systems bedeutet, so wissen wir nun, daß in einer Maschine mit indeterminiertem Wahlmechanismus — per definitionem — nicht alle Reaktionen geplant sein können. Der Konstrukteur baut also in die Maschine nur die fundamentalen Ordnungsprinzipien hinein, während sich die je und je verschiedenen Reaktionen aus den allgemeinen Prinzipien als Antworten auf ganz spezifische Umweltsituationen — und ohne weiteres Hinzutun des Konstrukteurs — entfalten. Was lebendige Systeme betrifft, so besteht eine ähnliche Beziehung zwischen dem Genotypus der sich entwickelnden Eizelle und den Reaktionen des fertigen Organismus. Im Genapparat müssen schon die wichtigsten Funktionsregeln des Organismus vorgegeben — präformiert — sein; aber wie sich der Organismus in jeder Situation im einzelnen verhalten wird, das läßt sich aus diesen Funktionsregeln nicht einfach ableiten, sondern das entsteht von Fall zu Fall neu aus der Begegnung zwischen Organismus und Umwelt. In dieser Anschauung verschmilzt die alte Antithese: Präformation oder Epigenese? zu einer neuen Einheit — wie fast alle Antithesen der vergangenen drei Jahrhunderte im zwanzigsten zu Einheiten verschmelzen, in denen jeder der antithetischen Begriffe seine Berechtigung und Individualität nicht ganz aufgibt. Präformiert sind die Funktionsregeln, die Reaktionsnormen; epigenetisch neu entstehen die spezifischen Reaktionsweisen unter dem Einfluß der Umwelt. Dies gilt natürlich in besonderem Maße für das Gehirn, das ja erst durch das Sammeln und Aufarbeiten von Erfahrung zu dem wird, was es im erwachsenen Organismus ist, obwohl die Art und Weise, wie Erfahrungen verwertet werden können, in starkem Maße vom Genotypus des einzelnen Individuums bestimmt ist.