

Gilt die Gleichung: Leben = Physik + Chemie? *

Von W. HEITLER

Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich

Summary

The question is raised whether the behaviour of a living organism can be reduced to the laws of physics and chemistry. The following features of these sciences are important for the problem: The laws are differential and do not act over a distance neither in space nor in time. The concept of shape is foreign to them and the behaviour of non-living matter is aimless. The initial and external conditions (which together with the law of physics determine the behaviour) are accidental in nature. A system with many degrees of freedom tends towards disorder (except at low temperatures). There is no coordination of processes taking place in separate locations.

Consider the growth of an organism. For the molecular processes in the cell during division, although usually described in terms of physics and chemistry, it cannot be proved or disproved that they follow from atomic physics. Assuming nevertheless that cell division is a process resulting from physics, repeated cell division could only give rise to an undifferentiated lump of cells and not to an organism consisting of various organs (leaves, roots, stem etc., see Fig. 1). There could be not coordination in the functions of these.

If life is to be reduced to physics this must also hold good for evolution. The question hinges on the probability of favourable macromutations, which lead to a higher developed organism. (Unfavourable mutations are eliminated by selection.) The example of the brain of a higher animal is considered and an upper limit is estimated for the probability of its development. It is essential here not to use any arguments already implying something like a "building plan" (which is foreign to physics and chemistry). The probability turns out to be so small that it can be stated that the mutations in question cannot be due to chance (in the sense of physics).

The behaviour of an organism in many respects is just the opposite of that of dead matter: it forms shapes, it shows directiveness and coordination of functions.

The problem of the coexistence of physical and biological (non-physical) laws is discussed. It is suggested that a generalization of the concept of uncertainty (occurring in quantum mechanics) may lead to an understanding of such a coexistence.

Wenn ein Physiker über ein Thema spricht, das die Biologie wenigstens zur Hälfte betrifft, so erfordert das in der heutigen Zeit der «Fachwissenschaften» vielleicht eine Rechtfertigung. Es handelt sich um die Frage, ob die Lebensvorgänge grundsätzlich auf die Gesetze der Physik und Chemie zurückgeführt und durch diese erklärt werden können. Es ist dies in der Tat eine sowohl bei Biologen als auch bei Physikern weitverbreitete Meinung, die oft sogar als selbstverständlich vertreten wird. Um die Frage, die zu den fundamentalsten der ganzen Naturwissenschaft gehört, einer Beantwortung näher zu führen, muß man die Physik kennen und wissen, wie die physikalischen Gesetze auf die Materie wir-

ken. Hiefür ist aber der Physiker zuständig. Die chemischen Gesetze konnten, wenigstens soweit es das Prinzipielle angeht, auf die der Atomphysik zurückgeführt werden. In der Praxis ist das allerdings für größere Moleküle nicht möglich, und ob es für die Makromoleküle der organischen Chemie (Proteine usw.) überhaupt gilt, mag zum mindesten in Frage gestellt werden. Ferner möchte ich ein entschiedenes Wort einlegen gegen die Abzirkelung in «Fachwissenschaften». Die Wissenschaft selbst kümmert sich nicht um die Fachgrenzen. Biologie, Chemie und Atomphysik begegnen sich im Gebiet der organischen Makromoleküle und gehen ineinander über. Wir sind im Begriff, babylonische Türme, einen für jedes Fach, zu errichten, aber die Bewohner verstehen schon heute des andern Sprache nicht mehr. Es ist deshalb nötig, daß es Wissenschaftler gibt, die versuchen, über die Grenzen ihres Fachgebietes hinauszugreifen. Die Fachleute können immer korrigierend eingreifen.

A. Einige Grundeigenschaften der Physik und Chemie

Wir stellen einige allgemeine Grundzüge der Physik zusammen. Alles Folgende gilt gleicherweise für die Chemie, soweit sie tote Materie betrifft. Sie ist ja mit der Physik in der Atom- und Molekülphysik amalgamiert.

1. Die Gesetze der Physik wirken ausnahmslos *differentiell* in Zeit und Raum. Das heißt: Aus den Gegebenheiten zu einer Zeit t_0 folgt zunächst nur das Geschehen im unmittelbar folgenden Moment $t_0 + dt$. Ebenso wirken die Gesetze nur in die unmittelbar räumliche Nachbarschaft. Daraus folgt, daß die Physik den Begriff *Gesamtgestalt nicht kennt*. Sie kennt auch kein Ziel; sie ist *zielblind*.

Der Gesamttablauf kann aus dem differentiellen Gesetz durch Integration berechnet werden – wenn er einfach genug ist (siehe 4).

2. Das Gesetz bestimmt nur Klassen von Abläufen. Der Einzelablauf ist außerdem durch die Anfangsbedingungen zu einem Zeitpunkt und durch äußere Bedingungen und Einwirkungen bestimmt. Beide sind in der Natur *zufällig*. Der Ablauf des Geschehens hat folglich eine *zufällige Komponente*. Nur in einem Laboratoriums-experiment oder bei einer (von Menschen konstruierten!) Maschine können die Bedingungen bewußt nichtzufällig gewählt werden. – Die Anfangsbedingungen sind zwar physikalisch aus einem früheren Zustand bestimmt, aber um den Zufall zu umgehen, müßte man zum Ursprung der Welt zurückgehen. Das ist unmöglich.

* Vortrag, gehalten in der Chemischen Gesellschaft, Zürich, am 11. Januar 1967.

3. Ein System von *vielen Freiheitsgraden* tendiert zur *Unordnung*. Nur bei speziellen Anfangsbedingungen, die überaus selten sind und die wegen 2 in der Natur praktisch nie vorkommen, und beim Ausschalten äußerer Einflüsse (was in der Natur nicht der Fall ist) kann Ordnung eintreten oder aufrechterhalten werden. Der zweite Hauptsatz ist ein Spezialfall dieser allgemeineren Tatsache. – Eine Ausnahme ist der Fall tiefer Temperaturen (wobei «tief» ein relativer Begriff ist, der auch Zimmertemperatur bedeuten kann). Hier tritt unabhängig von den Anfangsbedingungen Ordnung ein, z. B. bei Kristallen. Doch ist dies eine *erstarrte* Ordnung, in der nichts mehr geschieht. Eine geordnete Koordination von Vorgängen in räumlich getrennten Gebieten gibt es nicht.

Ein Beispiel für die Tendenz zur Unordnung: Eine Reihe Kugeln rollen dicht nebeneinander auf glatter Unterlage zwischen zwei parallelen, reflektierenden Wänden. Stoßen wir die Kugeln exakt parallel, mit derselben Geschwindigkeit senkrecht zur Wand an, so bleibt die Bewegung geordnet; die Kugeln verharren in paralleler Hin- und Herbewegung. Wird nur eine Kugel unter einem winzigen Winkel zu den andern angestoßen, so tritt bald ein Zusammenstoß mit einer Nachbarkugel ein, was in kürzester Frist alle Kugeln in Mitleidenschaft zieht und zur Unordnung führt. Das gleiche passiert, wenn ein Sandkorn in den Weg einer Kugel gelegt wird. – Unter allen Anfangsbedingungen gibt es nur eine verschwindend kleine Zahl, die zu geordneter Bewegung führt, und dies nur bei streng gewählten äußeren Bedingungen.

4. Sehr komplizierte, unregelmäßig gebaute Systeme (z. B. mehrere in Wechselwirkung stehende Eiweißmoleküle) lassen sich physikalisch nicht im einzelnen behandeln. Eine exakte Vorhersage des Verhaltens ist unmöglich. Auch ein moderner Rechenautomat ist dazu nicht imstande.

B. Das Wachstum der Pflanzen

1. Die *Zellteilung* wird durch die Spaltung des DNS-Moleküls in den Chromosomen eingeleitet. Das Doppelband öffnet sich, vorbereitetes Material lagert sich an den Innenseiten des geöffneten Bandes an, das DNS-Molekül reproduziert sich genau. Es folgen sehr komplizierte Vorgänge bis zur Zellteilung. – Auf den ersten Blick schon scheint das Geschehen so sinnvoll, auf die Zellteilung hin gerichtet, daß man Zweifel hegen muß, ob der Vorgang durch das zielblinde physikalische Gesetz allein hervorgebracht wird, obwohl er mit Hilfe von physikalisch-chemischen Begriffen beschrieben wird. Der Vorgang ist so kompliziert, daß eine detaillierte Verifikation der physikalischen Gesetze hier unmöglich ist (siehe A, Punkt 4). Die Frage, ob die Atomphysik hier *gilt* (und ausschließlich gilt), bleibt *unentschieden*. Die Frage, ob der Vorgang aus der Physik erklärt, d. h. abgeleitet werden kann, kann nur mit *nein* beantwortet

werden. – In Anbetracht dieser Umstände ist es wissenschaftlich nicht gerechtfertigt, die Gültigkeit der Atomphysik für das Zellgeschehen von vornherein als selbstverständlich anzunehmen. Die Beweispflicht hat derjenige, der die Gültigkeit der Atomphysik hier annimmt.

2. Trotz dieser Bedenken wollen wir annehmen, die Zellteilung sei ein elementarer physikalischer Prozeß. Was folgt weiter? Jede Zelle wird sich weiter teilen. Die differenziell wirkende Physik (siehe A, Punkt 1) kann weiter nichts bewirken als fortgesetzte Zellteilung. Es würde zuletzt ein Klumpen von Zellen entstehen, der allenfalls durch Oberflächeneffekte begrenzt wird. In Wirklichkeit aber zeichnen sich in einem bestimmten Stadium Formen ab, die sich ganz verschieden gestalten: Wurzel, Stamm, Blatt, usw. (vgl. die schematische Abb. 1). Die Entwicklung ist beendet, wenn für jedes Organ eine bestimmte *Gestalt* und *Größe* erreicht ist, was erst nach sehr zahlreichen Zellteilungen der Fall ist. Dies ist nach der differentiellen, zielblinden, gestaltlosen Physik unmöglich.

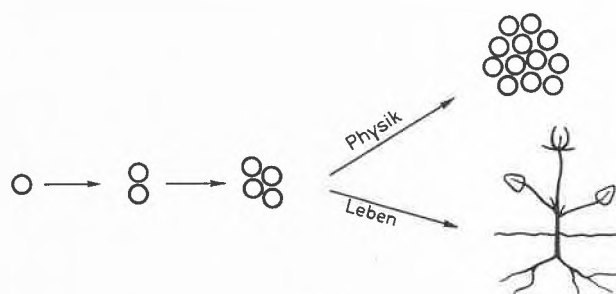


Abb. 1

3. Die verschiedenen Organe übernehmen verschiedene, aber auf einander abgestimmte Funktionen¹. Im Stamm der Sonnenblume kommen u. a. drei verschiedene Zellschichten vor, die folgende Funktionen haben: a) Verdickung der Wände, Stabilisierung des Stammes. b) Wasserbeförderung von den Wurzeln nach oben. c) Eiweißbeförderung von den Blättern nach unten. Die Zellen differenzieren sich erst an Ort und Stelle für ihre spezielle Funktion aus.

Die Larve der Köcherfliege baut sich ein Haus aus Sandkörnern. Schneidet man das Gehäuse hinten ab, so baut sie entweder hinten oder vorne an, wobei sich die Larve umdreht, oder sie verläßt das Gehäuse und baut ganz neu. Es ist ein sinnvolles, zielgerichtetes Verhalten, aber mit einer gewissen Variabilität.

All dies kann unmöglich aus der Physik mit ihrer zufälligen Komponente und ihrer Tendenz zur Unordnung hervorgehen (vgl. A, Punkt 2 und 3). Es gibt nach der Physik keinen Grund, warum in einem Klumpen von Zellen (der sich bis dahin, wie es scheint, homogen entwickelt hat) ein Teil der Zellen anfangen sollte, sich

¹ Die beiden folgenden Beispiele sind dem Buch von E. S. RUSSELL, *The Directiveness of Organic Processes*, deutsch: *Leitende Kräfte des Organischen*, Sammlung Dalp, Bern, entnommen.

anders zu entwickeln als ein anderer Teil. Die funktionelle Koordination, wie wir sie im Organischen vor uns haben, ist der Physik fremd. Die Physik und Chemie kennen nur das strenge Gesetz und den Zufall der Bedingungen. Das Verhalten der Larve (der man kaum ein bewußtes Vorausdenken zubilligen wird) ist sinnvoll und zugleich variabel, also niemals der Physik zu entnehmen.

C. Evolution

Wenn die Lebenserscheinungen im Prinzip auf Physik und Chemie zurückgeführt werden sollen, dann muß dies auch für die Evolution der Fall sein. In der Tat ist der Neodarwinismus der Versuch einer Theorie, die einer physikalischen Interpretation so nahe wie möglich kommt. Sie beruht auf zwei Thesen: dem Selektionsprinzip und der Existenz von Mutationen, die als *zufällig* angesehen werden. Von den spontan auftretenden Mutationen werden die schädlichen durch die Selektion eliminiert, während die «günstigen» bestehen bleiben und zu einer Höherentwicklung des Lebewesens führen. Wenn die Mutationen physikalisch erklärt werden sollen, dann *müssen* sie zufällig sein.

Die Kernfrage – die einzige, die sich uns stellt – ist, ob die günstigen, physikalisch zufälligen Mutationen häufig genug sein können, um die heutigen hochorganisierten Lebewesen zustande zu bringen. Angesichts der unglaublich komplizierten Konstitution eines solchen Lebewesens wird man hier allerdings schon von vornherein ernste Zweifel hegen müssen.

Man kann in verschiedenster Weise obere Grenzen für die Wahrscheinlichkeit von günstigen Mutationen abschätzen. Verschiedene derartige Abschätzungen sind auch publiziert. Dabei ist aber der folgende wesentliche Punkt zu beachten: Wenn wir wirklich die Wahrscheinlichkeit eines Zufalls im physikalischen Sinn betrachten wollen, dann müssen wir Sorge tragen, daß nirgends ein der Physik fremdes Element in unsere Betrachtung eintritt, das z. B. schon so etwas wie einen «Bauplan» des Lebens voraussetzt. Ein Bauplan ist ein nichtphysikalischer Begriff.

Die Annahme eines Kausalzusammenhangs zwischen der chemischen Struktur eines Makromoleküls und einer ganzen morphologischen Struktur des Organismus impliziert so etwas wie einen Bauplan – gleichgültig, wie viele Zwischenschritte angenommen werden – und kann nicht rein physikalischer Natur sein. Wenn wir davon ausgehen wollten, daß die Umstellung oder Neuanlage einer einiger Nukleotide im DNS-Molekül eine Höherentwicklung des Lebewesens bedeutet, dann setzen wir schon den komplizierteren Bauplan des neuen Organismus voraus. Niemals kann ein komplizierteres Gehirn aus einem einfacheren rein physikalisch dadurch entstehen, daß ein Makromolekül abgeändert wird. Wenn es geschieht, dann existiert in dem Zusammenhang Molekül → Gehirn schon *latent* der ganze neue Bauplan des komplizierteren Organs. Wenn das DNS-Molekül

sich dann «zufällig» in entsprechendem Sinn geändert haben sollte, dann ist der Zufall lediglich das auslösende Moment gewesen, die *Möglichkeit* der Neuentwicklung war aber schon vorher latent vorhanden. Für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit einer wirklich zufälligen Entwicklung, wie sie auf Grund der physikalischen Gesetze bei derartig komplizierten Systemen stattfinden würde, darf kein Gebrauch gemacht werden von Zusammenhängen, die aus der Biologie zwar bekannt sein mögen, aber nicht physikalisch begründet werden können.

Um die geradezu groteske Unwahrscheinlichkeit von zufälligen, günstigen Mutationen zu illustrieren, betrachten wir ein vereinfachtes Modell eines Gehirns. Es habe 10^6 Neuronen (beim Menschen 10^{10}). Von jedem Neuron gehe ein einziger Nervenstrang aus (beim Menschen etwa 100) und endige an einem andern Neuron. Die Neuronen sind also paarweise verbunden. Wir fragen nach der Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Verbindung. Physikalisch besteht nicht der geringste Grund, warum die eine Verbindungsart vor der andern ausgezeichnet sein sollte. Wir wissen nicht, wie viele Verbindungsarten biologisch äquivalent sind und vertauscht werden können, ohne die Funktion des Gehirns zu stören. Das Gehirn wäre aber kaum so kompliziert, wie es ist, wenn es gleichgültig wäre, *wie* die Neuronen verbunden sind.

Die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Verbindungsart ergibt sich ungefähr als $1:10^{(2 \cdot 10^6)}$, also eins zu einer Zahl mit zwei Millionen Nullen. Selbst wenn wir noch 99% der Nullen (!) wegstreichen, um biologisch äquivalenten Verbindungen Rechnung zu tragen, dann ergibt sich, daß eine zufällige Entwicklung absolut ausgeschlossen ist. Ob wir annehmen, daß die Evolution in den $600 \cdot 10^6$ Jahren der Lebensgeschichte in vielen kleinen oder weniger vielen großen Schritten vor sich gegangen ist – *zufällig im physikalischen Sinn war sie ganz bestimmt nicht*.

D. Folgerungen

Das Gewicht der genannten Argumente – man könnte noch zahlreiche ähnliche hinzufügen² – spricht eine eindeutige Sprache. Die Gesetzmäßigkeiten, die in einem Organismus herrschen, sind in ihrer Wirksamkeit denjenigen der toten Materie geradezu diametral entgegengesetzt. Fassen wir einige charakteristische Züge zusammen:

Physik	Organismus
gestaltlos	gestaltbildend
zielblind	zielgerichtet
Funktion: ungeordnet	koordiniert
Verhalten: strenges Gesetz + zufällige Anfangsbedingungen	sinnvolle Variabilität des Verhaltens

² Vgl. z. B. das Buch des Verfassers *Der Mensch und die naturwissenschaftliche Erkenntnis*, 4. Auflage, Vieweg, 1966.

Offenbar sind im Organismus Wirksamkeiten am Werk, die die tote Materie nicht kennt und die eben den grundsätzlichen Unterschied von Leben und Tod ausmachen. Die Frage entsteht jetzt, ob diese lebendigen Gesetzmäßigkeiten die Physik außer Kraft setzen, oder ob sie *neben* den physikalischen Gesetzen bestehen können. Es sieht so aus, als ob die organischen Gesetzmäßigkeiten den physikalischen, ohne sie direkt zu verletzen, als übergeordnetes Prinzip irgendwie superponiert seien und die Physik gewissermaßen überspielen könnten. Wie das verstanden werden kann, wollen wir unter E diskutieren. Es sei hier nur noch bemerkt, daß, nachdem wir neuartige Gesetzmäßigkeiten im Organischen fordern müssen, es wohl auch angemessen ist, ihre Wirksamkeit schon da anzunehmen, wo das Leben sich mikroskopisch äußert: im *molekularen* Zellgeschehen. Damit werden die Schwierigkeiten von B 1 auch anders beleuchtet.

E. Physikalische und organische Gesetzmäßigkeit

Um eine nichtphysikalische Wirksamkeit des Lebendigen zu vermeiden, ist vorgeschlagen worden, daß die Ordnung, die alles Organische zeigt, schon bei Beginn des Lebens entstanden ist und sich seither durch Vererbung erhalten (und vergrößert!) hat. Dieser Standpunkt kann nicht aufrechterhalten werden, weil der Organismus inzwischen zahllosen, zufälligen Einwirkungen ausgesetzt war, die die Ordnung längst zerstört hätten (vgl. A3). Die Schwierigkeit besteht nun darin, daß die Physik in gewissem Sinne etwas Abgeschlossenes ist und es nicht möglich ist, noch andere allgemeine Gesetze aufzupropfen. Eine direkte Verletzung physikalischer Gesetze ist nie beobachtet worden. Wir befinden uns offensichtlich in einem Dilemma, dessen Auflösung sicher sehr schwierig sein wird. Das aber ist kein Grund, ihm aus dem Wege zu gehen.

Ein Vorschlag, der Licht auf die Situation wirft und als Arbeitshypothese jedenfalls verdient, ernstgenommen zu werden, beruht auf einer Verallgemeinerung quantenmechanischer Begriffe und stammt von N. BOHR.

In der Quantenmechanik tauchte erstmalig der Begriff von Größen auf, die in einer bestimmten physikalischen Situation unbestimmt sind. So ist der Ort des Elektrons in einem Wasserstoffatom im Grundzustand unbestimmt.

Eine Bestimmung des Orts (d. h. eine Messung) ist zwar möglich (und führt zu einem eindeutigen, aber nicht voraussagbaren Resultat), bedingt aber einen Eingriff in das Atom und hat eine Änderung seines Zustandes zur Folge.

Wir verallgemeinern diese Begriffsbildung, indem wir annehmen, daß in einem *lebenden* Organismus der *gesamte physikalische Zustand* bis zu einem gewissen Grad *unbestimmt* ist. Dadurch wird es zunächst möglich, in den Organismus ganz *andere* Gesetzmäßigkeiten, die *lebendigen*, ohne Widerspruch einzufügen und auch eine gewisse Variabilität des Verhaltens zu verstehen. Es wird verständlich, daß biologisches Verhalten die physikalischen Gesetzmäßigkeiten «überspielen» kann. – Wie in der Quantenmechanik, ist es auch hier möglich, den physikalischen Zustand des Organismus festzulegen – aber dies bedeutet einen Eingriff in seine lebendigen Eigenschaften. Beispiel: Eine genaue Festlegung der Struktur und des Zustandes des DNS-Moleküls ist nur mit Röntgenstrahlen und dergleichen möglich. Dadurch werden Mutationen, also Störungen des Lebens, verursacht.

Es ist wesentlich, sich klarzumachen, daß wichtige Lebensfunktionen an Materieeinheiten von der Größe der Makromoleküle gekettet sind und daß physikalische Messungen an *kleinen* Objekten starke Mittel erfordern, die auch einen entsprechend schweren Eingriff verursachen. Um den physikalischen Zustand der lebenswichtigen Zellen im Organismus festzulegen, sind sicher ausgiebige Untersuchungen mit Röntgenstrahlen usw. nötig, die tief in das Lebendige eingreifen würden, und zwar, wie wir wissen, schädigend. Es ist äußerst wahrscheinlich, daß der Organismus abgetötet würde, sobald sein physikalischer Zustand vollständig bestimmt wäre. Von da ab folgt er den physikalischen Gesetzen – die zum Zerfall führen. Im lebendigen Zustand aber würden diese von den dem Leben eigenen Gesetzen «überspielt» werden – auf Kosten eines detailliert genauen physikalischen Ablaufs.

Die letzten Betrachtungen sind natürlich hypothetischer Natur. Sie zeigen aber, daß eine «Symbiose» von physikalischen und den ganz andersartigen, «lebendigen» Gesetzmäßigkeiten logisch denkbar ist. Damit besteht auch rein theoretisch nicht der geringste Grund, an der These der Alleinherrschaft der Physik im Bereich des Organischen festzuhalten.