Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 51/52

Artikel: Wandlungen der Wissenschaft - Kultur und Wissenschaft heute
Autor: Prigogine, Ilya
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73503

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.12.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Wandlungen der Wissenschaft – Kultur und Wissenschaft heute

Von **Ilya Prigogine**, Brüssel*)

Zahlreiche Diskussionen gehen davon aus, die wissenschaftliche Rationalität sei gewissermassen vorgegeben. Bereits in der Vergangenheit haben Philosophen wie *Kant*, *Bergson*, *Hegel* oder *Whitehead* den Fehler begangen, die *Wissenschaft als ein statisches Objekt* zu betrachten, das sie nach der jeweiligen Situation ihrer Epoche darstellten. In diesem Beitrag wird der Schwerpunkt auf die *interne Dynamik* der Wissenschaft gelegt.

Zunächst soll untersucht werden, aus welchen Gründen die historische Entwicklung der Wissenschaft, von der klassischen Mechanik bis zu den modernen Theorien (einschliesslich der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie) zu kulturellen Spannungen führen konnte. Sodann wollen wir den Nachweis führen, dass die Wissenschaft augenblicklich in einer raschen Umwandlung begriffen ist, und dass die *landläufige Kritik* an ihr, die sich in dem *Vorwurf der Zerstörung und Manipulation der Natur* konkretisiert, angesichts der neuesten Entwicklungen weniger gerechtfertigt erscheint. Schliesslich wollen wir diese Entwicklung anhand einiger konkreter Beispiele illustrieren.

Fortschritt oder kultureller Zerfall?

Das Schicksal der Gesellschaft in unserer heutigen, technisch hoch entwickelten Welt ist untrennbar mit der Art der wissenschaftlichen Tätigkeit verbunden. Die Zunahme der Bedeutung der Wissenschaft scheint nicht umkehrbar (irreversibel) zu sein, und es bedürfte schon einer weltweiten Katastrophe, um diese Tendenz rückgängig zu machen. Die wissenschaftliche Welt ist zwar schon vielfältig in die Gesellschaft integriert und bezieht von ihr die Mittel für ihr Fortbestehen, doch macht uns die *gegenwärtige Krise* die dringende Notwendigkeit deutlich, die *Beziehungen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft neu zu durchdenken.*

Die *Autonomie* der Wissenschaft, die *moralische Neutralität* des Wissenschaftlers, der weit über den konkreten Problemen seiner Epoche steht – solche Vorstellungen, deren *Anachronismus* heutzutage offensichtlich ist, konnten zu einer Zeit gerechtfertigt erscheinen, in der die Wissenschaft lediglich eine kulturelle Strömung war und der Wissenschaftler in der Gesellschaft eine nur marginale Funktion einnahm. Heute indessen bestimmen wissenschaftliche und technische Dimensionen die westliche Gesellschaft und lassen das Problem «Wissenschaft und Gesellschaft» unter völlig neuen Gesichtspunkten erscheinen.

Ich werde mich hier nur mit einem Gesichtspunkt dieses Problems befassen: Ich möchte untersuchen, *wie klassische Wissenschaftstheorien – die für das globale Bild der Wissenschaft grundlegend sind – die kulturelle Entfremdung fördern konnten, die eine der Ursachen der gegenwärtigen Krise ist.* Anschliessend möchte ich zeigen, dass neuere Entwicklungen, die aus der inneren Dynamik der Wissenschaft entstanden sind, die Hoffnung rechtfertigen, dass der von *Lord Snow* [1] beschriebene Gegensatz zwischen den «beiden Kulturen» überwunden werden kann.

Auf das Problem der kulturellen Krise wurde u.a. auch in einer Veröffentlichung der UNESCO «La Science et la Diversité des Cultures» (Wissenschaft und die Verschiedenheit der Kulturen) hingewiesen, aus deren Einleitung ich folgenden Passus zitieren möchte: «Seit über einem Jahrhundert hat die wissenschaftliche Aktivität innerhalb des sie umgebenden kulturellen Raumes eine solche Ausweitung erfahren, dass es so aussieht, als würde sie die Kultur insgesamt ersetzen. Einige sehen darin nur eine Täuschung, hervorgerufen durch die Geschwindigkeit dieses Wachstums; die kulturellen Kräfte werden nach ihrer Ansicht erneut die Oberhand gewinnen und dieses Wachstum in den Dienst des Menschen stellen. Für andere berechtigt dieser Triumph die Wissenschaft endlich, die gesamte Kultur zu bestimmen, die im übrigen diese Bezeichnung nur noch insofern verdient, als sie über den wissenschaftlichen Apparat verbreitet wird. Andere schliesslich, beunruhigt durch die Manipulation, der Mensch und Gesellschaft durch die Macht der Wissenschaft ausgesetzt sind, sehen in ihr das Gespenst des kulturellen Zerfalls.» [2].

Wissenschaft: ein Fremdkörper?

Nach diesen Vorstellungen erscheint die Wissenschaft als ein Fremdkörper, den die Kultur nur beherrschen oder bekämpfen kann, wenn sie sich ihm nicht ausliefern will. Parallel hierzu finden wir die Vorstellung vom *bindungslosen Wissenschaftler*, der für die Gesellschaft, in der er lebt, ein Fremder ist. Diese Konzepte hängen mit einem *positivistischen Wissenschaftsbild* zusammen, nach dem Wissenschaft ausserhalb der Kultur stehen sollte, da sie eine Rationalität verkörpert, die weder mit kulturellen noch mit historischen Traditionen zusammenhängt.

Neuere Untersuchungen der Geschichte der Wissenschaftsentwicklung in der europäischen Gesellschaft haben den Mythos, Wissenschaft entwickle sich unabhängig von der Kultur, zerstört. Zum Beispiel zeigt *Michel Serres* in seiner Untersuchung der Situation im 17. und 19. Jahrhundert, dass Wissenschaft keine eng umschriebenen Grenzen kennt, sie existiert nicht in kultureller Isolation, sondern im Gegenteil, sie stellt einige traditionelle philosophische Fragen in einen

*) Referat, gehalten auf dem Kolloquium der Europäischen Gemeinschaften über «European Society and its Interactions with Science and Technology» in Brüssel (31. Mai – 2. Juni). Der Beitrag wurde uns freundlicherweise von der Zeitschrift «Wirtschaft und Wissenschaft», Heft 3, 1977, herausgegeben vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, D-4300 Essen 1, zur Verfügung gestellt.

Der Autor, am 23. Januar 1917 in Moskau geboren, ist Direktor der Internationalen Institute für Physik und Chemie an der Freien Universität Brüssel und Direktor des Zentrums für statistische Mechanik und Thermodynamik an der Universität von Texas in Austin. Prigogine doktorierte im Jahre 1945 an der Freien Universität Brüssel. Dieses Jahr ist ihm der *Nobelpreis für Chemie* für seinen «Beitrag zur irreversiblen Thermodynamik, insbesondere der dissipativen Strukturen» zuerkannt worden.

neuen Zusammenhang: Ihre Modelle werden verbreitet und finden ihren Niederschlag weit vom Ausgangspunkt in Literatur, Malerei und Philosophie.

Einzigartige Dynamik der Wissenschaftsentwicklung

Es wäre allerdings falsch, die Tatsache leugnen zu wollen, auf die sich die positivistische Illusion gründete: der *besondere Charakter der Dynamik der Wissenschaftsentwicklung seit dem 17. Jahrhundert*, die ganz einmalige Verbindung zwischen Experiment und Theorie, welche die Grundlage dieser Dynamik bildet.

Die *Originalität* der europäischen Wissenschaft ist in dem *Zusammentreffen besonderer sozio-ökonomischer, religiöser* [3] *und kultureller Faktoren* zu sehen. Es gab den Begründern der modernen Wissenschaft den Anstoss, die wahre Beschaffenheit der Natur und die Prinzipien, denen sie gehorcht, mit Hilfe *streng definierter Methoden des mathematischen Beweises, der empirischen Beobachtung und der quantitativen Messung* aufzudecken. Ihre Überzeugung war, dass die Natur bestimmten Gesetzen gehorcht, dass diese Gesetze durch Forschung entdeckt werden können und dass sie dem menschlichen Verstand zugänglich sind. Diese Überzeugung schuf eine «arbeitsame» Wissenschaft, die sich des eingeschlagenen Weges sicher war.

Die Wissenschaft ist aus der *Renaissance* hervorgegangen, aber sie ist nicht ihr einziges Produkt. Die entscheidenden Beiträge etwa von *Descartes*, *Leibniz*, *Pascal* oder *Newton* zur modernen Wissenschaft können nicht von ihrem restlichen Werk getrennt werden, das die gesamte europäische Kultur ihrer Zeit umfasste. Es sei hier auch an das literarische und enzyklopädische Werk von *d'Alembert*, die wissenschaftlichen und kritischen Schriften von *Diderot* und daran erinnert, dass es *Voltaire* war, der die Newtonsche Physik in Frankreich populär machte. Im 18. Jahrhundert zweifelten einige, wie *Rousseau* und *Diderot*, den Nutzen der Wissenschaft und ihres wahren Beitrags zum Fortschritt der Menschheit an. Die institutionellen Aspekte der Wissenschaften waren nicht der Kritik entrückt (man denke z.B. an die Unbeliebtheit der «Académie des Sciences» am Vorabend der Französischen Revolution), doch niemand bezweifelte die kulturelle Zugehörigkeit der Wissenschaft zur Gesellschaft. Die Wissenschaftler lebten mitten in der Gesellschaft, die ihnen Fragen stellte, ihre Antworten diskutierte und neue Gedanken aufnahm.

Im 19. Jahrhundert spricht man nicht mehr von «Naturphilosophie». In England weicht der herkömmliche Begriff «natural philosopher» dem neuen Wort «scientist». Dies war das Zeichen einer neuen Umwälzung. Ihre Ursachen waren vielfältig, sie waren sowohl äusserer Natur als auch wissenschaftsimmanent. Die Entwicklung der Wissenschaft zeigte mehr und mehr die Form eines von einer *inneren Notwendigkeit gesteuerten autonomen Prozesses*. Die Trennung zwischen den wissenschaftlichen Disziplinen wurde immer schärfer, und nur die Spezialisten selbst konnten die spezifische wissenschaftliche Problemstellung ihrer Arbeit definieren. Die Öffentlichkeit konnte nur noch passiv das aufnehmen, was «Popularisierer» im Namen der Wissenschaft verbreiteten. Im grossen und ganzen identifizierte sie Wissenschaft mit *Wahrheit* und akzeptierte die Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung widerspruchslos.

Die Kantsche Trennung und ihre Überwindung

Die Bruchlinie zwischen Wissenschaft und europäischer Gesellschaft zeigt sich an der Kantschen Kritik. Sie brachte Wissenschaft, Forschung und Universitäten in einen engeren Zusammenhang und trug damit zum *Bruch* zwischen Kultur und wissenschaftlicher Forschung bei.

In der «Kritik der reinen Vernunft» werden die wissenschaftlichen Ergebnisse als Ausdruck der menschlichen Vernunft selbst angenommen und dienen als Grundlage für eine Legitimation der Vernunft, die bestimmte Fragen und Probleme, welche die zeitgenössische kulturelle Welt beschäftigten, als unzulässig verwarf. Zum ersten Mal trat die in der Wissenschaft wirksam werdende *theoretische Vernunft als Wächterin über jegliche Verstandestätigkeit* auf. Die Welt als Gegenstand der theoretischen Vernunft war jedoch für Kant auf den Begriff der Identität reduziert. Dagegen befassten sich Moral, Ästhetik, Politik und Religion, obwohl sie aus der Welt des Theoretischen verbannt sind, mit den beiden fundamentalen Fragen des Menschen: Was kann er glauben, und: Was kann er hoffen?

Auf diese Weise trennt Kant Wissenschaft völlig von Weisheit und Wahrheit. Diese Trennung muss überwunden werden, und uns scheinen endlich die Voraussetzungen dafür erfüllt, dass die Wissenschaft von der Welt reden kann, in der wir leben, ohne sie zu negieren oder auf eine Täuschung zu reduzieren. Unsere Wissenschaft ist nicht mehr die Kants. Wir verstehen aufs neue *Diderot* und können uns daranmachen, *Leibniz* zu lesen – zwei Denker, die vor dem Kantschen Bruch lebten und deren Fragestellungen den unseren näherkommen.

Die klassische Wissenschaft und die Reduktion auf die Identität

Die *Ursachen* für die erwähnten *kulturellen Spannungen* sehe ich im *statischen Charakter der physikalischen Weltbeschreibung*, der sich aus der klassischen Dynamik ergibt und der in modernen Theorien wie der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie beibehalten wurde. Die *Zeit* erscheint *nur* als *ein Parameter, zwischen Gegenwart und Zukunft besteht kein Unterschied*. Dieses Konzept der physikalischen Welt geht auf die *Bewegungsgesetze Galileis* zurück. Er definiert den Gegenstand Physik durch das wesentliche Kriterium, dass er mathematisch erfassbar sein müsse.

Seit *Aristoteles* war die Physik traditionell die Wissenschaft der Prozesse, der in der Natur ablaufenden Veränderungen. Für Galilei und seine Nachfolger ist jedoch die einzige präzis mathematisch erfassbare Veränderung die *Veränderung des Bewegungszustandes, die Beschleunigung*. Hier vollzog sich eine radikale Wende, denn in der aristotelischen Physik ging man davon aus, dass örtliche Bewegung (als Bahn) in der sublunaren Welt stets von erheblicher qualitativer Veränderung begleitet wäre.

Die Forderung nach mathematischer Erfassbarkeit führte nun dazu, alle «natürlichen Tendenzen», alle «endlichen Prozesse», aus der Physik zu verbannen. Physikalische Zeit wurde von nun an als die Zeit verstanden, die in der Beschleunigung auftritt. *Koyré* [4] spricht von der dynamischen Bewegung als einer «Bewegung ohne Bezug zur Zeit oder, was noch seltsamer klingt, einer Bewegung, die in einer zeitlosen Zeit abläuft, eine Vorstellung, die ebenso paradox ist wie die einer Veränderung ohne Veränderung». Bewegung ist das einzige, was die Physik von den in der Natur ablaufenden Veränderungen berücksichtigt. Danach ist, wie u.a. *Bergson* betont, in der klassischen Physik alles gegeben, Veränderung ist nichts anderes als Verneinung des Werdens und Zeit ist lediglich ein Parameter, der von den Veränderungen, die er beschreibt, unberührt bleibt.

Die *Dynamik* wird durch drei eng miteinander zusammenhängende Wesensmerkmale bestimmt: den *statischen Charakter des «alles ist gegeben»*, die *Umkehrbarkeit sowie die Gesetzmässigkeit der beschriebenen Umwandlungen*. Bewegung wird in Zustände zerlegt, deren zeitlicher Ablauf so-

wohl in Richtung Vergangenheit als auch in Richtung Zukunft erfolgen kann. Nach diesem Gesetz ist die Beschreibung eines in die Zukunft gerichteten Systems der eines Systems völlig gleich, in dem sämtliche Geschwindigkeiten umgekehrt wurden und das nun zeitlich rückwärts in die Vergangenheit läuft. Vergangenheit und Zukunft unterscheiden sich in keiner Weise.

Bild einer stabilen Welt

In dieser Beschreibung wird scharf getrennt zwischen Bewegungsgesetz und Anfangsbedingungen. Nur die Bewegungsgleichungen interessieren den Physiker, während die Anfangsbedingungen willkürlich sind. Anfangsbedingungen und Bewegungsgleichungen bestimmen sämtliche Zustandsphasen des Systems, sowohl in der Zukunft als auch in der Vergangenheit. Man denke an die *Fiktion von Laplace:* Ein Dämon, der sämtliche Positionen und Geschwindigkeiten aller miteinander wechselwirkenden Teilchen wüsste, könnte die Zukunft des Universums ebenso vorhersagen, wie er seine Vergangenheit beschreiben könnte.

Dieses *Bild einer stabilen Welt, die dem Werden entgeht, ist bis heute das Ideal der theoretischen Physik geblieben.* Die Newtonsche Dynamik, vervollständigt durch seine grossen Nachfolger wie *Laplace*, *Lagrange*, *Hamilton*, erschien als ein geschlossenes, universelles System, das auf jede Frage eine Antwort geben konnte. Dementsprechend wurde jede Frage, auf die die Dynamik keine Antwort geben konnte, als *Scheinproblem* abgetan. Die Dynamik eröffnete somit den Zugang zur letzten und vollständigen Realität, während alles übrige (der Mensch eingeschlossen) aus dieser Sicht der Dinge nur eine Art Illusion darstellte, der grundlegende Bedeutung fehlte [5, 6, 7].

Zum Hauptziel der Physik musste also die Identifikation jenes mikroskopischen Niveaus werden, auf dem die Gesetze der Dynamik gerade noch anwendbar waren und das folglich als Basis für die Erklärung aller beobachtbaren Erscheinungen dienen konnte. Hier trifft sich die klassische Physik mit der Auffassung der griechischen Atomisten: «...nur die Atome und der leere Raum» [8]. Natürlich wissen wir heute, dass die Newtonsche Dynamik nur einem Teil der physikalischen Welterfahrung entspricht. Sie gilt für Objekte unseres eigenen Massstabes, deren Massen in Gramm oder Tonnen gemessen werden und deren Geschwindigkeiten im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit gering sind.

Die *universellen Naturkonstanten*, deren wichtigste die *Planksche Konstante h* (die in erg/sek. gemessen wird und deren Wert im c.g.s.-System $6 \cdot 10^{-27}$ beträgt) und die *Lichtgeschwindigkeit c* ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s) sind, *begrenzen die Gültigkeit der klassischen Dynamik.* Sobald wir es mit sehr leichten (Atomen, Elementarteilchen) oder hyperdichten Objekten (wie z.B. «Schwarze Löcher») zu tun haben, treten neue Erscheinungen auf. Die *Newtonsche Dynamik* muss dann durch die *Quantendynamik*, die den endlichen Wert von *h* berücksichtigt, und durch die *relativistische Dynamik*, in der *c* enthalten ist, ersetzt werden. Aber diese neuen Dynamiken, die in anderer Hinsicht revolutionär sind, haben von der Newtonschen Physik das Ideal der Beschreibung eines statischen Universums – des Seins und nicht des Werdens – übernommen.

Wir wissen, welche Rolle nichtwissenschaftliche Faktoren, vor allem ethischer und religiöser Natur, bei der Begründung der atomistischen Konzeption gespielt haben: das Vorübergehende mit dem Dauerhaften zu verbinden, zu beweisen, dass die Welt letzten Endes dem menschlichen Geist zugänglich ist und auf der persönlichen Ebene weder Verheissungen noch Drohungen enthält – das ist die Essenz des epikureischen Atomismus, der vor allem eine Philosophie der Gelassenheit ist.

Der Mensch – von der Natur isoliert?

Der ans Wunderbare grenzende Erfolg solcher Ideen in der klassischen Physik und in der modernen Quanten- und Relativitätsphysik hat allerdings zu einer *neuen Beunruhigung* geführt: Wenn die Wirklichkeit einer zeitlosen Welt nicht mehr das Ergebnis einer ethischen Entscheidung, sondern von der Wissenschaft bewiesene Wahrheit ist, wohin gehören dann wir als dem Werden unterworfene Wesen in dieser Welt? Die Atomisten des 17. Jahrhunderts, wie *Boyle* oder *Gassendi*, vermieden dieses Problem. In einer dualistischen Welt konnte man seinen Körper zusammen mit der gesamten Natur als das *Ergebnis eines blinden Spiels der Atome* beschreiben – die *Seele aber war nicht der natürlichen Ordnung unterworfen*, sie war nach dem Bilde Gottes geschaffen. Die atheistischen Philosophen des 18. Jahrhunderts konnten diese Zwischenstellung des Menschen zwischen der Schöpfung und dem Schöpfer jedoch nicht mehr akzeptieren. Diejenigen, die wie *Diderot* die Wissenschaft ihrer Epoche in Frage stellten, erhoben eine neue Forderung: Sie verkündeten, der Mensch sei ganz der Natur zugehörig, deshalb sollte die Natur als etwas beschrieben werden, das Menschen hervorbringen kann, das in der Lage ist, sich spontan in immer komplexere Formen bis zum Erscheinen des «Animal pensant» zu organisieren.

Dieser Punkt verdient besondere Beachtung, da der *Vitalismus* heutzutage einen schlechten Ruf hat. Die vitalistische Betrachtungsweise hat ihren Ursprung im krassesten Materialismus. Wenn *Diderot* fordert, der Materie die Fähigkeit zu einer kohärenten eigenen Aktivität zuzuschreiben, und wenn er zweifelt, ob die mathematische Physik als Erbin *Galileis* und *Newtons* sich mit den Problemen des Lebens befassen konnte, bezieht er sich dabei in keiner Weise auf *Spiritualität*. Für *Diderot* war die klassische Physik nicht in der Lage, die materialistische Auffassung zu stützen, wonach der Mensch zur Natur gehört und das Denken durch «organisierte Materie» hervorgerufen werde. Interessant ist der Kontrast zwischen Diderots Optimismus und dem Pessimismus einer Reihe von modernen Biologen, wie z.B. *Jacques Monod* [21], welche die *dualistische Weltauffassung* von der klassischen Physik übernommen haben. Ist es daher wunderlich, wenn das philosophische Denken nach *Kant* zum grossen Teil ein Protest gegen diese Isolierung des Menschen von der Natur war? Ob bei *Hegel*, *Schelling*, *Engels*, *Bergson* oder *Whitehead*, überall stossen wir auf das *Problem des Werdens*. Sie alle suchen nach neuen Formeln, die in der Lage sind, die Rolle der Zeit zu revidieren und die Zugehörigkeit des Menschen zum Universum auszudrücken. Nur so können wir dem Alptraum der menschlichen Einsamkeit in einem toten und sinnlosen Universum entrinnen.

Ablehnung früherer Alternativen: Quelle heutiger Krisen

Soweit diese Philosophen eine Alternative zur Wissenschaft, eine *neue Erkenntnisform* vorschlagen wollten, wurde ihre Arbeit oft lächerlich gemacht, wurde die Sterilität ihrer Konzepte den wunderbaren Errungenschaften der Wissenschaft gegenübergestellt. Und es ist sicher richtig, dass weder *Hegel* noch *Bergson* noch andere eine Methode formuliert haben, deren Ergebnisse denen der quantitativen Wissenschaften vergleichbar wären. Aber eben die Ablehnung der Legitimität ihrer Unzufriedenheit, der Berechtigung ihrer Kritik, der Bedeutung ihrer Vorschläge, hat zu dem kulturellen Bruch geführt, dessen Erben wir sind.

Das 19. Jahrhundert war jedoch nicht nur das Jahrhundert der philosophischen «Verteidigung» der Zeit. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen war es, wie *Boltzmann* formulierte, auch das *Jahrhundert der Evolution* [9]. In der Physik selbst führte die Untersuchung der *Wärmekraftmaschinen* und damit zusammenhängend der *«irreversiblen» Pro-*

zesse wie der *Wärmeleitung* zur *Formulierung der Wärmelehre*. Der *zweite Hauptsatz der Thermodynamik* betrifft die Zunahme der Entropie (als des Masses der wachsenden «Unordnung») und die Verlaufsrichtung der Zeit. Bei der Untersuchung *biologischer und geologischer Evolutionsprozesse* sowie in *historischen Arbeiten* jedoch wurde zur gleichen Zeit der *Schwerpunkt auf das Werden* gelegt, etwas, was die Physik nach wie vor als Illusion betrachtete. Eben diese Konfliktsituation müssen wir heute überwinden.

Zu einer auf Wandel ausgerichteten Wissenschaft

Wir müssen aber noch mehr tun. Den Wandel zu «legalisieren» genügt nicht. Wir müssen zu einer Wissenschaft gelangen, die auf *Wandel und Veränderung* ausgerichtet ist. Hier treffen wir uns mit den Bemühungen der Soziologen. *Danzin* meint, Europa müsse eine «zweite Renaissance» erleben, und er fragt: «Ist das Wesentliche nicht die Assimilation des Wandels durch unsere Kultur?» [10].

Somit kann und muss ein fruchtbarer Dialog zwischen Physik und Mathematik auf der einen Seite und den Humanwissenschaften auf der anderen Seite aufgenommen werden. Denn «Wandel» ist ein Begriff von hoher Komplexität. Ihn auf den Ablauf eines deterministischen Gesetzes zu reduzieren, entspricht nur einem seiner vielen Aspekte.

Eine neue Wissenschaft für eine neue Welt

Es ist ein aussergewöhnliches Zusammentreffen, dass gleichzeitig mit der bisher ungeahnten Beschleunigung der sozio-kulturellen Entwicklung auch unser physikalisches Weltbild erschüttert wurde. Dort, wo die klassische Wissenschaft Harmonie und Gleichgewicht sah, entdecken wir nunmehr Labilität, Veränderlichkeit, Vielfalt. Die Perspektiven von der Physik selbst erfuhren eine tiefgreifende Umwandlung.

Am Anfang dieses Jahrhunderts schien dieser Wissenschaftszweig für namhafte Physiker seiner Vervollkommnung nahe gekommen: Die Welt erschien transparent und «auf eine stabile, fundamentale Basis reduziert» [11]. Doch dann kam die Zeit der grossen Überraschungen, die eine Abkehr von der bisher als statisch betrachteten Welt erzwang: Es zeigte sich, dass die *Welt der Elementarteilchen von einer ungeahnten Komplexität* ist. *Die traditionelle Annahme von der Einfachheit des Mikrokosmos sowie die Möglichkeiten einer «einheitlichen» Theorie der Wirklichkeit erweisen sich als Überreste einer überholten Wissenschaft. Auf der Ebene des Makrokosmos bietet sich ein ähnliches Bild: Die Entdeckung der Expansion des Weltalls und der Reliktstrahlung des Universums zwingen uns, eine historische Betrachtung des Weltalls* oder zumindest der uns zugänglichen Region des Weltalls zu akzeptieren.

Wir brauchen daher *neue Methoden*, die es ermöglichen, die Welt der Prozesse und des Wandels zu beschreiben, ohne sie auf Illusionen oder das Kunstgebilde mathematischer Annäherungen zu reduzieren. Zu diesem Zweck müssen wir über die deterministische Beschreibung des Universums hinausgehen, die dem Formalismus der Klassischen Mechanik entsprach. In dieser Welt der Bewegungsgleichungen für Massenpunkte war alles gegeben, und eine Entwicklung im Sinne des Werdens konnte hier nur eine Illusion sein. Aber ist die klassische Dynamik, gefolgt von der Quantenmechanik, nicht, wie zahllose Lehrbücher behaupten [12], ein in sich abgeschlossenes Lehrsystem?

Wie können wir die Grundlagen der Physik erweitern?

Angesichts dieser weitverbreiteten Auffassung ist die heutige Entwicklung der Klassischen Mechanik und der Quantenmechanik um so bedeutungsvoller. Meiner Ansicht nach wird sie zu einer ganz neuen Betrachtung des Begriffs «Zeit» und sogar des «Naturgesetzes» führen. *Eine neue Physik ist im Werden.* Genauso grundlegend wie die beachtenswerten Entdeckungen im Bereich der Elementarteilchen ist in diesem Zusammenhang wahrscheinlich die Frage: Welches ist der Rahmen, innerhalb dessen wir unsere Ergebnisse ausdrücken müssen, wie können wir die Grundlagen der Physik erweitern?

Die Beantwortung einiger dieser Fragen erfordert ein hochspezifisches Fachwissen, vor allem in diesem frühen Stadium. Es erscheint mir jedoch sehr wichtig, bei der Betrachtung der Beziehungen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft darauf hinzuweisen, dass die moderne Wissenschaft neue Eigenschaften aufweist, aufgrund derer zahlreiche ideologische Konflikte zwischen Wissenschaft und Kultur im weiteren Sinn bereits der Vergangenheit angehören.

Wir wissen heute, der Determinismus der klassischen Mechanik entspringt einer *übermässigen Idealisierung des Begriffs der Anfangsbedingungen.* Die moderne Dynamik ist mit den Keplerschen Gesetzen der Planetenbewegung und der Lösung des Zweikörperproblems durch Newton entstanden. Doch wird die Aufgabe ungleich komplizierter, sobald wir einen dritten Körper, etwa einen weiteren Planeten, in unsere Betrachtung einbeziehen. Sobald ein System eine gewisse Komplexität erreicht hat (wie im *«Dreikörperproblem»*), ist es uns trotz genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen nicht mehr möglich, das Verhalten dieses Systems während eines langen Zeitraums exakt vorherzubestimmen. Diese Unsicherheit besteht sogar, wenn die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Anfangsbedingungen vernachlässigbar klein ist. Sie müsste genau null sein, damit die Vorhersagen auf lange Zeiträume ausgedehnt werden könnten.

Zwar können wir jederzeit Vorhersagen über begrenzte Zeitabschnitte machen. Da jedoch unsere Kenntnis der Welt sich auf Messungen mit endlicher Genauigkeit stützt, ist es unmöglich – und zwar nicht mehr nur technisch, sondern grundsätzlich – herauszufinden, ob etwa das Sonnensystem, in dem wir leben, für alle Zukunft stabil ist [13]. Wir können *nur statistische Vorhersagen* machen und *auf Mittelwerte bezogene Ergebnisse vorhersagen.*

Statistische Aspekte in der klassischen Dynamik

Welch seltsamer Wandel! Jahrelang haben die Vertreter der klassischen Orthodoxie versucht, die Quantenmechanik von sämtlichen statistischen Aspekten zu befreien [14]. Der Satz von *Einstein* ist bekannt: «Gott würfelt nicht!» Nun aber nimmt die klassische Dynamik, wenn lange Zeitabschnitte betrachtet werden, selbst das Wesen einer statistischen Theorie an [15]. Was noch wichtiger ist: Wir müssen der Tatsache Rechnung tragen, dass selbst die *klassische Dynamik, die perfekteste aller theoretischen Wissenschaften, keine «abgeschlossene» Wissenschaft* ist. Wir können ihr sinnvolle Fragen stellen, auf die sie keine Antwort bereithält.

Es soll hier nicht gesagt werden, die klassische Mechanik sei gewissermassen falsch gewesen, sondern, dass sie sich auf einfache Situationen beschränkte, deren Charakteristika nicht auf komplexere Fälle extrapoliert werden können. Die klassische Dynamik ist ein Thema, das alle fasziniert, die sich mit der Geschichte der Wissenschaft befassen. Sie ist die älteste der theoretischen Wissenschaften und hat zahlreiche Eigenschaften, welche die Komplexität der inneren Dynamik der Wissenschaftsentwicklung illustrieren. Wir beginnen jetzt erst, die Komplexität der dynamischen Beschreibung, selbst im Rahmen der klassischen Dynamik, zu begreifen.

Die klassische Dynamik beschreibt zumindest auch weiterhin eine *mikroskopische Realität*, deren Verhalten ent-

schieden komplizierter ist, als man erwartete. In gewisser Hinsicht bleibt auch ihr Absolutheitsanspruch erhalten: nämlich in ihrer *Unabhängigkeit vom Menschen, der sie beschreibt*. Erst die Quantenmechanik (die Mechanik der mikroskopischen Systeme, Atome, Protonen, Mesonen) hat die Galileischen Fundamente der Physik erschüttert; sie zerstörte den klassischen Glauben, die physikalische Beschreibung im naiven Sinne sei realistisch, die Sprache der Physik könne die Eigenschaften eines Systems unabhängig von den Versuchs- und Messbedingungen beschreiben.

Messungen – eine der «heissesten» Fragen unserer Zeit

Dank der *Quantenmechanik* wurde ein bis dahin *verborgener Konflikt zwischen der dynamischen Beschreibung und dem Messvorgang offenkundig*. Die Vorstellung der klassischen Physik war, Messmethoden seien jederzeit reproduzierbar und dies mit der Reproduzierbarkeit der durch physikalische Gesetze beschriebenen Erscheinungen im Einklang stehe. Die quantenmechanische Messung zeigte jedoch, dass der Messvorgang selbst das gemessene Ereignis veränderte. Die Aufzeichnung und die Verstärkung der Effekte durch Messgeräte erweisen sich so als irreversibel; zum Beispiel zeugt dabei die Absorption oder Emission von Licht von der Veränderung des Beobachtungsobjektes durch die Beobachtung selbst. In der theoretischen Physik befasst man sich deshalb heute sehr eingehend mit dem Problem der Messungen. Es verkörpert eine der «heissesten» Fragen unserer Epoche, nämlich: Ist es möglich, die mikroskopische Welt «isoliert» zu verstehen? [14]. Wir kennen die Materie und vor allem ihre mikroskopischen Eigenschaften nur durch Messgeräte, makroskopische Objekte, die aus einer riesigen Zahl von Atomen und Molekülen bestehen. Diese Geräte sind sozusagen eine *Verlängerung unserer Sinnesorgane*. Das Gerät ist der Vermittler zwischen der Welt, die wir erforschen, und uns selbst.

Aber im Gegensatz zur absoluten Irreversibilität der Messungen ist die Wellenfunktion, die es ermöglicht, die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Messungen, die ein bestimmtes Gerät (irreversibel) registrieren kann, zu charakterisieren, gerade durch die Reversibilität der klassischen Dynamik gekennzeichnet. Die Quantenmechanik ermöglicht daher die Feststellung, dass die (statische und reversible) Sprache der Dynamik keine bevorzugte Entsprechung in einer autonomen natürlichen Realität haben kann. Wir müssen diese Sprache verstehen als Sprache makroskopischer, lebender Wesen, die mit dem Messgerät den grundlegend irreversiblen Charakter der Zeit teilen, ohne den kein Leben möglich ist. Selbstverständlich würde ein Atom die Welt anders beschreiben. Aber das Atom kann weder denken noch schreiben. Das Leben und Denken gehören unserer makroskopischen Welt an, in der die Prozesse eine unermessliche Zahl von Atomen umfassen [16].

Soll man also nun die grundlegenden Gleichungen der klassischen Physik oder der Quantenphysik zurückweisen? Sollen wir auf einen vollständigen Umsturz warten, auf eine neue Erkenntnisart wie die, von der *Bergson* träumte, die der Irreversibilität und der Evolution einen angemessenen Platz in der Physik zuweisen würde? Angesichts der eindeutigen Übereinstimmung mit Experimenten, die uns der Apparat der klassischen oder der Quantenmechanik ermöglicht hat, ist ein einfaches Aufgeben der grundlegenden Konzepte der klassischen Physik weder wahrscheinlich noch wünschenswert.

Wählen, welche Fragen gestellt werden sollen

Bohr [17] und *Heisenberg* [18] haben den Begriff der *Komplementarität* in die Quantenphysik eingeführt, *Rosenfeld* und andere haben ihn diskutiert. Man kann dieses Beispiel auf andere, nicht unmittelbar wissenschaftliche Bereiche übertragen: *Die Welt ist viel reicher als es irgendeine einzige Sprache ausdrücken kann.* Die Musik erschöpft sich nicht in ihren aufeinanderfolgenden Stilarten. Ebenso können wir die wesentlichen Gesichtspunkte unserer Erfahrung nicht in einer einzigen Beschreibung zusammenfassen. Wir brauchen mehrere Beschreibungen, die sich nicht aufeinander reduzieren lassen, die jedoch durch präzise Übertragungsregeln (Transformationen) miteinander verbunden sind. Die wissenschaftliche Arbeit ist mehr selektive Forschung als Entdeckung einer vorgegebenen Realität: Es geht darum, zu wählen, welche Fragen gestellt werden sollen.

Die Reversibilität der Dynamik und die Beschreibung, welche die Irreversibilität verkörpert, sind zwei sich ergänzende Beschreibungsarten, die durch Transformation miteinander verbunden sind [19]. Bei der ersten wird die *Entwicklung des Systems in Form von Bewegungen und Bahnen*, wie sie die Astronomen beobachten, wiedergegeben, oder in Form von *Energieniveaus*, wie sie mit Hilfe der Quantenwellenfunktionen berechnet werden können. In der Welt der Planetenbahnen und harmonischen Oszillationen, auf die sich die Fragen beziehen, die zu dieser Beschreibungsart gehören, hat weder die Irreversibilität einen Sinn, noch die Gesamtheit der dissipativen Prozesse, die zu unserer physikalisch-chemischen Welt gehören.

Die zweite Beschreibungsart verwendet *Prozesse, die einen Anfang und ein Ende haben.* Diese Formulierung müssen wir verwenden, wenn wir von Messung sprechen und ganz allgemein von einer Welt, in der Energie umgewandelt wird, also z.B. Oszillator-Schwingungen gedämpft werden, Elementarteilchen zerfallen oder chemische Reaktionen eingehen. Es gibt somit keine einzelne Grundebene für die Beschreibung der Natur. In philosophischer Terminologie entsprechen die beiden Beschreibungsarten dem «Sein» und dem «Werden». Aber weder Sein noch Werden allein können ein vollständiges Bild vermitteln.

Wir befinden uns an einem entscheidenden Punkt der Wissenschaftsentwicklung. Allmählich werden die *Umrisse einer neuen Definition der Wissenschaft* und einer *neuen Rationalität* deutlicher. Wir befinden uns noch im Nebel – wir sind selbst zu sehr beteiligt, um so objektiv zu urteilen, wie wenn wir uns mit der Vergangenheit befassten.

Dissipative Strukturen und Ordnung durch Fluktuationen

Unsere Hauptthese ist, dass ein besseres Verständnis des Konzepts und der Mechanismen des Wandels uns ein gemeinsames Paradigma gibt, das der Ausgangspunkt für einen wahrhaft *interdisziplinären Ansatz* sein könnte. Statischer Charakter des Werdens [22], Grenzen des Determinismus, Irreversibilität, Komplementarität – das sind einige Schlüsselbegriffe, zu denen uns die Analyse der neuen Auffassung von der Wissenschaft geführt hat. In diesem neuen Kontext müssen wir das *Problem des Wandels* stellen. Dieses Problem ist so umfassend, dass es uns vom traditionellen Gegenstand der Physik zu den Humanwissenschaften führt. In all diesen Fällen müssen wir strukturelle Transformation, «Innovationen» beschreiben, und das erfordert eine neue Methodologie.

Dass Physik und Humanwissenschaften hier in einem Atemzug genannt werden, bedeutet nicht eine reduktionistische Haltung. Wir gehen von der Feststellung aus, selbst im Bereich verhältnismässig einfacher physikalisch-chemischer Erscheinungen seien die Beobachtung und die Vorhersage raum-zeitlicher Strukturen und damit zusammenhängender Vorgänge der *Selbstorganisation* möglich [20].

In unserer Brüsseler Forschergruppe haben wir, ausgehend von der Thermodynamik, einige spezifische Beispiele dazu untersucht. Die klassische Thermodynamik befasst sich mit physikalisch-chemischen Systemen, die durch sogenannte «Randbedingungen» in den Bezug zur übrigen Welt gebracht werden. Sie unterscheidet *drei Klassen von Systemen:* isolierte, geschlossene und offene Systeme (siehe Bild 1–3). Die Erde ist ein nahezu geschlossenes System; sie nimmt Energie von der Sonne auf, doch bleibt ihre Masse annähernd konstant. Städte sind ein gutes Beispiel für ein offenes System, das sowohl Energie als auch Materie mit der Umgebung austauscht.

Lange Zeit beschränkte sich die *Thermodynamik* auf die *Untersuchung der Gleichgewichtszustände in geschlossenen und offenen Systemen*, weil die damit zusammenhängenden Probleme relativ einfach sind. Die Erfolge waren spektakulär; insbesondere wurden die Phasenübergänge zwischen den drei Aggregatzuständen der Materie aufgeklärt. Jedoch wurde dadurch auch die Vorstellung verstärkt, Stabilität und Permanenz seien die grundlegenden Eigenschaften physikalischer Systeme.

Die jüngere Entwicklung der *Thermodynamik der Nicht-Gleichgewichtszustände* brachte die neue und überraschende Entdeckung, dass *Ungleichgewicht Ordnung schaffen kann.* Die Abweichung vom Gleichgewicht würde demnach in gewisser Weise wie die Temperatursenkung wirken, die zu dem geordneteren Zustand der Materie führt, wie ihn der Kristall, eine im Gleichgewicht befindliche Struktur, darstellt. Es besteht jedoch ein grundlegender Unterschied: Eine im Gleichgewicht befindliche Struktur wie der Kristall besteht, wenn sie einmal gebildet wurde, unabhängig von jedem späteren Austausch mit der Aussenwelt. Dagegen können Ungleichgewichtsstrukturen sich nur aufrechterhalten, wenn sie von *Energie- und Materieströmen «genährt»* werden. Bleiben diese aus, ergeht es genauso wie bei einer Stadt, die «verschwinden» würde, wenn sie von ihrer Umwelt abgeschnitten wird. Die *Ungleichgewichtsstrukturen werden «dissipative» Strukturen* genannt, im Gegensatz zu den Strukturen der klassischen Thermodynamik, in denen, wenn sie einmal gebildet sind, keine Energie-Dissipation (Zerstreuung) mehr auftritt.

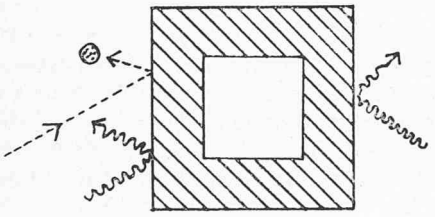


Bild 1. Isoliertes System. Die Materie kann das System weder verlassen noch eindringen. Die Hülle ist für Energie undurchlässig

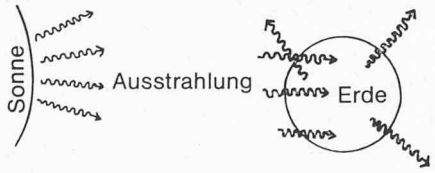


Bild 2. Die Erde, ein nahezu geschlossenes System

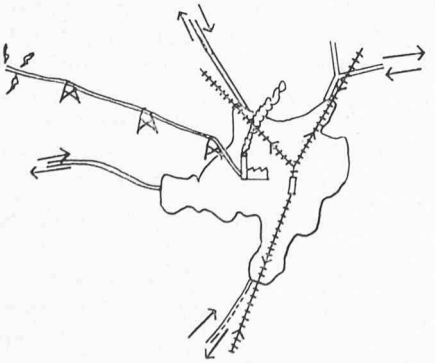


Bild 3. Die Stadt, ein offenes System

Ohne in eine systematische Diskussion einzutreten, wollen wir einige allgemeine Kennzeichen dieser dissipativen Strukturen erörtern. Der am eingehendsten untersuchte Bereich sind die *chemischen Strukturen.* Die dissipativen Prozesse sind die chemischen Reaktionen zwischen den Systembestandteilen. Die Ordnung schaffende Abweichung vom Gleichgewicht wird durch den ständigen Fluss eines oder mehrerer Reagenzien aufrechterhalten, der die chemischen Reaktionen zwingt, sich ständig zu wiederholen, ohne dass das chemische Gleichgewicht erreicht werden kann. Dissipative Strukturen erfordern *nichtlineare Mechanismen.*

Was bedeutet nun alles dies auf der molekularen Ebene, im Bereich der «chemischen Kinetik»? Angenommen, bei einer Kollision zwischen Molekülen (A und X) werden andere Moleküle (B und Y) gebildet (Formel 1):

$$A + X \xrightarrow{k_1} B + Y$$

Die Geschwindigkeit dieses Prozesses ist proportional der Häufigkeit der Kollisionen zwischen $A + X$. Dadurch ergibt sich im Mittel (Formel 2):

$$\frac{dY}{dt} = \frac{dB}{dt} = k_1 AX = -\frac{dX}{dt} = -\frac{dA}{dt}$$

A, B, X, Y sind die Konzentrationen der entsprechenden Molekülarten, k_1 ist die kinetische Konstante. Natürlich ist auch der umgekehrte Ablauf möglich (Formel 3):

$$B + Y \xrightarrow{k_2} A + X$$

Durch Addition der Wirkungen von Formel 1 und Formel 3 ergibt sich (Formel 4):

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dA}{dt} = -k_1 A X + k_2 B Y = -\frac{dY}{dt} = -\frac{dB}{dt}$$

Ist das System isoliert oder geschlossen, bewegt es sich auf einen Gleichgewichtszustand hin, bis sich die Auswirkungen der Prozesse in Formel 1 und Formel 3 aufheben. Wir erhalten dann (Formel 5):

$$-k_1 A X + k_2 B Y = 0$$

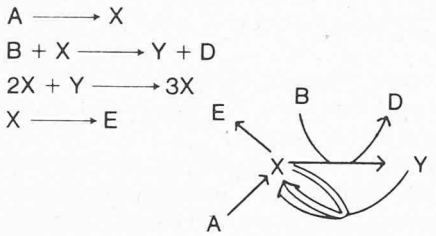
oder

$$\frac{AX}{BY} = \frac{k_2}{k_1} = K$$

Dies ist das *Gesetz der Massenwirkung,* das für das chemische Gleichgewicht gilt. Von besonderer Bedeutung für die Bildung dissipativer Strukturen sind die *autokatalytischen Reaktionen,* bei denen ein Molekül X in eine Reaktion eintritt, durch die es selbst erzeugt wird, etwa (Formel 6):

$$X + Y \longrightarrow 2X$$

oder auch: X erzeugt Y, das seinerseits X erzeugt. Dies gilt für das folgende System (Formel 7):



In diesem Falle liegt eine *Rückkoppelung* (oder *positiver Feedback*) vor. Nichtlineare Mechanismen wie Autokatalyse, «cross-catalysis» und positiver oder negativer Feedback ermöglichen unter bestimmten Bedingungen eine *spontane Strukturierung*.

Wenn wir solche Systeme (mit nicht-linearen chemischen Mechanismen) weit vom chemischen Gleichgewicht fernhalten und die Konzentrationen der Ausgangs- und Endprodukte durch Austauschprozesse mit dem Milieu regulieren – z.B. indem in Formel 7 D und E gegenüber A und B in geringen Konzentrationen als den Gleichgewichtskonzentrationen gehalten werden –, erzeugen wir für eine berechenbare Abweichung vom Gleichgewicht (die Instabilitätsschwelle) instabile Situationen. Diese Schwelle markiert die Entfernung vom Gleichgewicht, von der aus die geringste Fluktuation das System zwingen kann, seinen stationären Zustand zu verlassen. In diesem Fall führt die Verstärkung der Fluktuation nach einer Übergangsperiode das System zu einem neuen kohärenten Zustand, der die Beteiligung einer enormen Anzahl von Molekülen impliziert. Es können zum Beispiel chemische Wellen entstehen, die Signale oder uneinheitliche stationäre Zustände verursachen, in denen die chemische Reaktion eine räumliche Organisation aufrechterhält.

Neue Aggregatzustände der Materie

Genau dies sind die dissipativen Strukturen, echte neue Aggregatzustände der Materie. Die Bedeutung dieser dissipativen Strukturen steht heute für zahlreiche chemische und biologische Reaktionen fest, und die ihnen gewidmete Literatur nimmt an Umfang rasch zu. Dissipative Strukturen treten nur dann auf, wenn spezifische Voraussetzungen im Bereich der chemischen Mechanismen erfüllt sind. *Während die Gleichgewichtsgesetze universal sind, verhält sich die Materie im Ungleichgewicht sehr spezifisch.* Im Gegensatz zu Versuchen, wie sie im Zusammenhang mit der *Informationstheorie*, der *Systemtheorie* und der *Katastrophentheorie* unternommen werden, müssen wir die mikroskopischen Voraussetzungen für die Bildung kohärenter Zustände in Systemen, die sich im Ungleichgewicht befinden, sehr eingehend untersuchen. Der Nachteil der gesamten Versuche war es, dass sie sehr leicht zu Tautologien führten.

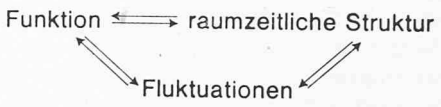
Die Theorie der dissipativen Strukturen verbindet drei wesentliche Elemente:

a) Die Funktion (oder die elementare Aktivität, hier die Mechanismen der chemischen Reaktion in der molekularen Grössenordnung);

b) Die kohärente raumzeitliche Strukturierung dieser Funktion (z.B. die Bildung von makroskopischen chemischen Wellen);

c) Die Fluktuationen als «elementare Ereignisse», die eine statistische Abweichung vom Mittelwert darstellen und fähig sind, eine Struktur zu schaffen.

Es ist wichtig festzustellen, dass diese Beschreibung gleichzeitig *deterministische* (chemische Gleichungen, Austauschvorgänge mit dem Milieu) und *stochastische Elemente* in sich einschliesst, wobei die letzten eine besonders grosse Rolle an den Punkten spielen, an denen die neuen Strukturen auftreten, den *Bifurkationspunkten (Gabelungspunkten)*. Auf diese Weise erhalten wir folgendes Schema [23]:



Komplexe Systeme können eine Folge von Gabelungspunkten aufweisen. Wir können ein Diagramm der möglichen Lösungen in Abhängigkeit von einem Parameter p aufzeichnen, der die Abweichung von der Gleichgewichtslage angibt (Bild 4).

Zwischen zwei Gabelungspunkten folgt das System deterministischen Gesetzen, z.B. den Gesetzen der chemischen Kinetik (Formel 1–7), während in ihrer Nachbarschaft die Fluktuationen eine wesentliche Rolle spielen und den Weg bestimmen, den das System einschlagen wird. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Zahl der Lösungen (mögliche Zustände) mit der Entfernung vom Gleichgewicht rasch zunimmt. Für den Wert p_1 des Parameters, der diese Entfernung misst (z.B. ein Verhältnis von Konzentrationen, das durch den Austausch mit dem Milieu gegeben ist), gibt es nur einen möglichen stabilen Zustand, in p_2 sind es bereits acht.

«Historisches» Element in Physik und Chemie

Angenommen, die Beobachtung zeigt uns, dass das System, dessen Gabelungsdiagramm in Bild 4 dargestellt ist, sich im Zustand C befindet. Bei jeder «Erklärung» dieses Zustandes muss das Durchlaufen der Zustände A und B berücksichtigt werden. Keine Erklärung kann C «zeitlos» aus dem Wert des Parameters p ableiten. Dies ist äusserst bemerkenswert, da auf diese Weise ein *«historisches» Element in die Modelle der physikalisch-chemischen Wissenschaft Eingang findet,* das bisher nur den Wissenschaften vorbehalten schien, die sich mit biologischen, gesellschaftlichen und kulturellen Phänomenen befassen.

Wir haben bereits die Rolle der Fluktuationen hervorgehoben. Zum Abschluss dieses Abschnittes sei noch auf die Rolle des eng damit verbundenen Begriffs der *«strukturellen Stabilität»* hingewiesen, auf dessen Bedeutung für die Untersuchung gesellschaftlicher Probleme später eingegangen wird.

Betrachten wir ein Molekül (z.B. ein Biopolymer), das von den regelmässig angeordneten Einheiten A und B gebildet wird:

ABABABABABABA...

Angenommen, dieses Molekül hat autokatalytische Eigenschaften, mit deren Hilfe seine eigenen Kopien wesentlich rascher synthetisiert werden als die anderen Makromoleküle, die aus anderen Sequenzen der gleichen Einheiten zusammen-

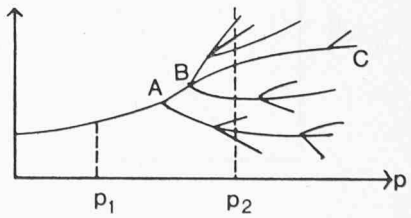


Bild 4. Gabelungsdiagramm. Lösungen

gesetzt sind. Aufgrund eines Fehlvorganges, einer Fluktuation, könnte jedoch das Molekül die Produktion einer leicht abweichenden Kopie katalysieren, etwa der Form

ABBABABBABABBA...

Dieses molekulare «Monstrum» kann seinerseits wieder autokatalytische Eigenschaften haben, und es stehen nunmehr zwei «Nachkommen» für die Verwendung der Monomere *A* und *B* miteinander in Wettbewerb. Wird das Monstrum verschwinden oder wird es im Gegenteil in dem System, das beide erzeugt, das ursprüngliche Molekül ersetzen?

Wir gelangen somit zu einer Konzeption, nach der die Fluktuationen dort die Gesamtordnung des Systems bestimmen, wo die Möglichkeit der Wahl im Bereich der jeweiligen Häufigkeiten besteht, mit denen die verschiedenen Etappen einer Gesamtfunktion durchlaufen werden (was durch die Rückkoppelungsschleifen möglich ist), oder wo verschiedene Parallelfunktionen miteinander in Wettbewerb treten.

Ordnung durch Fluktuation und das Gesellschaftssystem

Die Begriffe, die wir bei der Beschreibung chemischer Reaktionen eingeführt haben, können auch auf sehr unterschiedliche Probleme *ökologischer* oder *sozialer Natur* angewendet werden. Dabei sei vorweg auf zwei Punkte hingewiesen:

- Die Anwendung *mathematischer Methoden* muss dabei grundsätzlich *«deskriptiv»* bleiben: Wir haben keine Theorie, aus der wir Gesetze des biologischen oder menschlichen Verhaltens «ableiten» könnten.
- Es besteht *kein Widerspruch zwischen der mathematischen Erfassbarkeit und einem bewussten Verhalten, in dem sich der Einfluss des Wissens auf das Handeln manifestiert.* Die Verschiedenheit der Verhaltensweisen wird dadurch deutlich, dass die meisten Modelle einen statistischen Charakter beibehalten müssen, der die Wirkung von Fluktuationen einschliesst.

Betrachten wir das klassische Modell des Wettbewerbs zwischen «Pflanzenfressern» X – die sich auto-katalytisch vermehren und eines gewaltsamen Todes sterben – und «Raubtieren» Y – die sich proportional zu den Beutetieren vermehren, die sie fressen können, und an Altersschwäche sterben (Formel 8):

$$A + X \xrightarrow{k_1} 2X$$

$$X + Y \xrightarrow{k_2} 2Y$$

$$Y \xrightarrow{k_3} E$$

Es handelt sich um das sogenannte *Volterra-Lotka-Modell.* Wichtig für uns ist die Tatsache, dass wir es in Form chemischer Gleichungen ähnlich denen des Typs in Formel 2 darstellen können. Die zeitliche Entwicklung von X wird dann folgendermassen geschrieben (Formel 8a):

$$\frac{dX}{dt} = k_1AX - k_2XY$$

Diese formale Analogie ermöglicht es, unsere Ergebnisse im Bereich der chemischen Reaktionen auf Probleme der *Bevölkerungsdynamik* anzuwenden.

Betrachten wir ein konkretes Beispiel, auf das wir den Begriff der strukturellen Stabilität anwenden können: die *Zunahme einer Population X in einem gegebenen Milieu* (Formel 9):

$$\frac{dX}{dt} = KX(N - X) - dX$$

Dabei ist K bezogen auf die Geburtenrate, d auf die Mortalität und N auf die Kapazität des Milieus, die Belastung durch die Population X zu ertragen. Die Lösung von Formel 9 kann in Form einer «logistischen Kurve» dargestellt werden (Bild 5).

Damit ist eine rein *deterministische Entwicklung* dargestellt: *Das Populationswachstum hört auf, wenn das Milieu gesättigt ist.*

Nicht in diesem Modell erfasste Ereignisse können jedoch dazu führen, dass in diesem Milieu plötzlich eine – zunächst zahlenmässige kleine – neue Art auftritt, die durch andere ökologische Parameter K, N und d gekennzeichnet ist.

Wir haben es dann mit einer *«ökologischen Fluktuation»* zu tun, die das *Problem der strukturellen Stabilität* aufwirft: Die neue Art kann verschwinden oder die erste Art verdrängen. Es lässt sich einfach nachweisen [24], dass die neue Art (N_2, d_2, K_2) die erste nur dann verdrängt, wenn (Formel 10):

$$N_2 - \frac{d_2}{K_2} > N_1 - \frac{d_1}{K_1}$$

Die Besetzung der «ökologischen Nische» erfolgt dann gemäss Bild 6.

Dieses Modell definiert quantitativ präzise die Bedeutung des *«Überlebens des am besten Angepassten»* («survival of the fittest») im Blick auf die Nutzung einer bestimmten «ökologischen Nische».

Eine ganze Anzahl solcher Modelle kann entwickelt werden, die unterschiedliche Überlebensstrategien der Populationen und deren Wirksamkeit in Abhängigkeit von den verfügbaren Ressourcen berücksichtigen. Zum Beispiel können wir unterscheiden zwischen Arten, die ein vielfältiges Nahrungsangebot nutzen («Generalisten») und solchen, die sich auf eine bestimmte Nahrung beschränken («Spezialisten»). Ebenso können wir die Tatsache berücksichtigen, dass bestimmte Arten einen Teil ihrer Populationen für «unproduktive» Funktionen, etwa «Soldaten», immobilisieren. Ähnlich verhält es sich mit dem sozialen Polymorphismus der Insekten [25].

Wir können versuchen, die Begriffe der strukturellen Stabilität und der Ordnung durch Fluktuation auf noch viel

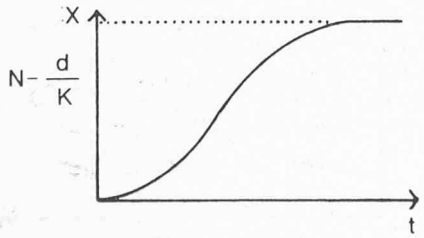


Bild 5. Logistische Kurve der Zunahme einer Population X in einem gegebenen Milieu

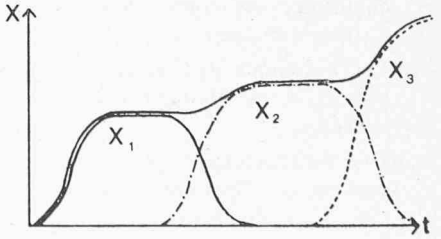


Bild 6. Besetzung einer ökologischen Nische durch aufeinanderfolgende Arten

komplexere Probleme, und – mit einigen drastischen Vereinfachungen – sogar auf die menschliche Evolution anzuwenden. Unser Team hat vor kurzem die Untersuchung des faszinierenden Phänomens der *Verstädterung* in Angriff genommen [26]. Ausgehend von der logistischen Gleichung (Formel 9) ist ein Stadtgebiet gekennzeichnet durch die Zunahme seiner Kapazität N durch das Anwachsen wirtschaftlicher Funktionen. Wenn S_i^k die wirtschaftliche Funktion k im Punkt *i* (der «Stadt» *i*) ist, müssen wir Formel 9 durch eine Gleichung folgenden Typs ersetzen (Formel 11):

$$\frac{dX_i}{dt} = KX_i\,(N + \sum_k R^k S_i^k - X_i) - dX_i$$

R_i^k ist ein Proportionalitätskoeffizient. Aber S_i^k wächst selbst mit der Bevölkerung X in Abhängigkeit von einer komplizierten Retation: S_i^k spielt hier eine autokatalytische Rolle, doch hängt die Autokatalyse von der Nachfrage ab, die im Punkt i nach dem durch die Funktion S_i^k gelieferten Produkt *k* besteht. (Diese Nachfrage kommt aus einer Region, die begrenzt wird durch die Transportkosten, die sich mit der Entfernung von i erhöhen, und durch die Konkurrenz von Produktionsstätten an anderen Plätzen.)

In diesem Modell kann das Auftreten einer wirtschaftlichen Funktion mit einer Fluktuation verglichen werden (die das Modell nicht erklären muss, deren Konsequenzen es jedoch zu berechnen hat). Das Auftauchen der wirtschaftlichen Funktion kann durch die ursprüngliche Gleichförmigkeit einer Bevölkerungsverteilung zerstören und Arbeitsplätze schaffen, die die Bevölkerung an einem Punkt konzentrieren.

Um bestehen zu können, ziehen Arbeitsplätze die Nachfrage der umliegenden Punkte an sich. Oder in einer bereits urbanisierten Umgebung können diese durch den Wettbewerb mit ähnlichen, besser entwickelten oder günstiger gelegenen wirtschaftlichen Funktionen zerstört werden; sie können sich auch gleichzeitig, aber auf Kosten der Zerstörung der einen oder anderen Funktion entwickeln.

Bild 7 illustriert die «mögliche Geschichte» der Urbanisierung einer ursprünglich gleichförmigen Region, in der zwei wirtschaftliche Funktionen versuchen, sich an jedem Punkt eines Netzes von zehn Örtlichkeiten zu entwickeln. Die zehn Versuche folgen aufeinander, sind erfolgreich oder scheitern nach einer zufälligen Zeitsequenz. Das Endergebnis hängt in sehr komplexer Weise vom deterministischen Wirken der Wirtschaftsgesetze und vom zufälligen Charakter der zeitlichen Aufeinanderfolge der Fluktuationen ab. Die endgültige Verteilung erscheint als grundsätzlich unvorhersehbar, und der Determinismus ist nicht nur auf der mikroskopischen, sondern auch auf der makroskopischen Ebene durchbrochen. Dennoch zeigen sich unabhängig von der Geschichte der Fluktuationen bestimmte Grundzüge ab. So führt etwa eine Verbesserung der Verkehrsmittel zum Verschwinden zahlreicher wirtschaftlicher Zentren, sie erhöht aber anderseits die Bedeutung derjenigen, die sich durchsetzen konnten. Desgleichen vergrössern sich die Industriebetriebe.

Beispiel: Stadtstruktur

Es gibt zahlreiche weitere Beispiele für die Möglichkeit der Anwendung dieser Methoden. Wir haben auch die interne Struktur der Städte (Verteilung der Wohnungen, der Produktionsstätten und der Dienstleistungen) untersucht. Bei all diesen Beispielen spielen eine Reihe von Faktoren eine wesentliche Rolle:

a) Der nichtlineare Charakter des Verhaltens; so können etwa zwei Populationen von verschiedenartiger numerischer Grösse sich verschieden entwickeln;

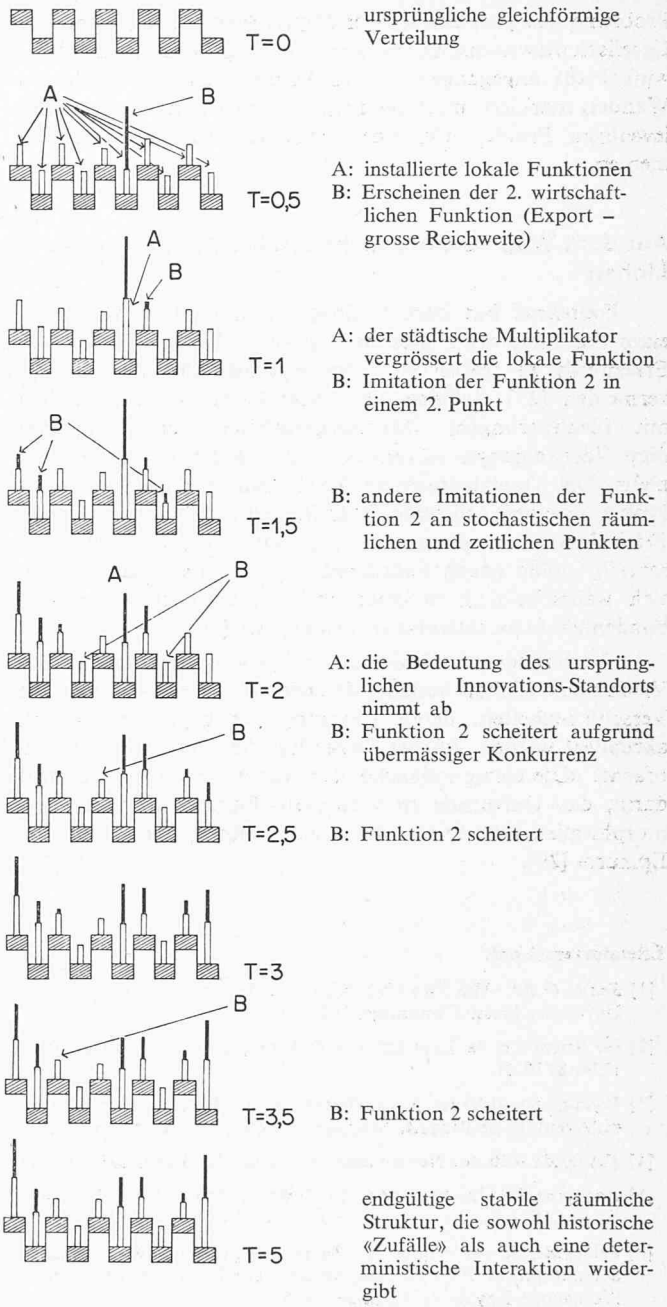


Bild 7. Die «mögliche Geschichte» der Urbanisierung einer ursprünglich gleichförmigen Region

b) Der aleatorische Charakter (Wahrscheinlichkeitscharakter) der Entwicklung, die trotzdem zu ganz bestimmten raum-zeitlichen Strukturen führt;

c) Die Organisation des Raumes hängt eng mit der Bevölkerungsdichte, ihren Aktivitäten und den Kommunikationsmöglichkeiten (einschliesslich der Wirkung der Massenmedien) zusammen.

Die Auswirkungen der Kommunikation tendieren erwartungsgemäss zu einer Beseitigung der räumlichen Ungleichmässigkeiten, machen jedoch ebenfalls neue Differenzierungen und Strukturierungen möglich.

Zwar wurde die Mathematik in den Humanwissenschaften, vor allem in der Wirtschaftswissenschaft, bereits in grossem Massstab angewendet. Was jedoch an den Beispielen, die wir gesehen haben, bemerkenswert ist, ist die Tatsache dass,

Probleme aus dem Bereich der Physik, der Ökologie und der Gesellschaftswissenschaften von einem gemeinsamen Blickwinkel aus angegangen werden können. Die Dynamik des Wandels markiert, trotz der tiefgehenden Unterschiede in der jeweiligen Problematik, eine Reihe von gemeinsamen Elementen.

Auf dem Weg zu einer nicht totalitären kulturellen Einheit

Whitehead hat darauf hingewiesen, dass es von jeher eines der Ziele der Philosophie gewesen ist, die Einheit der Erkenntnis zu realisieren, Verzweigungen des Denkens zu vermeiden [27]. Solange die Wissenschaft sich vordringlich mit Idealisierungen, «Museumsstücken», befasste, waren diese Verzweigungen unvermeidlich, doch dies gilt heute nicht mehr. Die Vereinheitlichung der Kultur, die Einfügung der Physik in einen grösseren Rahmen ist von neuem möglich. *Erich Jantsch* hat diese neue Lage klar dargestellt, wenn er schreibt: «Die neuen Paradigmata der Wissenschaft werden sich wahrscheinlich in einer neuen Wissenschaft der Verbundenheit (connected-ness) entwickeln.» [28].

«Verbundenheit» bedeutet das Bewusstsein, dass in der Vielfalt eine Einheit besteht; sie bedeutet daher auch, dass die Verschiedenheiten, deren Ursprung wir begreifen können, akzeptiert werden. *Michel Serres* hat das zum Ausdruck gebracht: «Die einzig mögliche, d.h. vitale, Philosophie besteht darin, das Universale zu verwerfen. Pluralismus und Polymorphismus. Hier finden wir erneut Leibniz, und hinter ihm Epikur.» [29].

Eine Welt, welche die Qualität einschliesst

Die Vielzahl und Intensität der geistigen Strömungen, die zu den gleichen Ergebnissen gelangen, sind bemerkenswert. Wir können so verschiedene Gebiete nennen wie die Dialektik, die Phänomenologie, die Theorie der einseitigen Systeme, die Quantenmechanik mit dem Prinzip der Komplementarität und die Theorie der Selbstorganisation auf der Basis der Thermodynamik des Ungleichgewichts. Jede dieser Theorien hat Stärken und Schwächen, doch ist ihre Aussage eindeutig: Der Weg geht von einer Welt der Quantität zu einer Welt, welche die Qualität einschliesst. Und die Qualität ist die Voraussetzung für jede Theorie der Veränderung.

Im Verlauf dieses Beitrags war oft von den Verheissungen der Wissenschaft des 17. Jahrhunderts die Rede. Warum sollten wir nicht von den Verheissungen der Wissenschaft des 20. Jahrhunderts sprechen? Ich glaube, dass diese Verheissungen nicht nur die Vision eines «grösseren» Universums einschliessen, sondern auch die eines Universums, in dem wir beginnen, uns zurechzufitnden, mit dem wir uns verbunden fühlen. Ein neuer Naturalismus – warum nicht? Aber ein Naturalismus, der eine Synthese unserer Vergangenheit und eine Verheissung für die Zukunft ist.

(Besonderen Dank schulde ich Fräulein Isabelle Stengers. Viele der hier dargelegten Ideen stützen sich auf Themen, die wir in gemeinsamen Veröffentlichungen bearbeitet haben. Ich danke auch den anderen Mitgliedern der Arbeitsgruppen von Brüssel und Austin, vor allem Frau F. Boon und Frau M. Sanglier sowie den Herren Allen, Deneubourg, George, Grecos, Lefever, Nicolis und Pahaut. Ferner möchte ich Herrn Erich Jantsch für die wertvollen Anregungen danken, die er mir bei der Ausarbeitung dieses Referats gegeben hat.)

Literaturverzeichnis

[1] *Snow, C.P.:* «The Two Cultures and a Second Look», Cambridge University Press, Cambridge, 1974.

[2] La Science et la Diversité des Cultures, UNESCO, PUF, Paris, 1974, S. 15–16.

[3] *Kojeve, A.:* «L'Origine Chrétienne de la Science Moderne» in: «L'Aventure de l'Esprit, Mélanges Koyré», Hermann, Paris, 1964

[4] *Koyré, A.:* «Etudes Newtoniennes», Gallimard, Paris, 1968, S. 32.

[5] *Prigogine, I.:* «La Naissance du Temps», Acad. Roy. Belg., Bull. Cl. Sc., 1973.

[6] *Prigogine, I.:* «Physique et Métaphysique» in: «Connaissance Scientifique et Philosophie», volume spécial du Bicentenaire de l'Académie Royale de Belgique, 1975.

[7] *Prigogine, I.* und *Stengers, I.:* «Nature et Créativité» in: «La Revue de l'AUPELF, vol. XIII, no 2, 1975.

[8] *Prigogine, I.:* «La Fin de l'Atomisme», Acad. Roy. Belg., Bull. Acad. Cl. Sci., 1969.

[9] *Boltzmann, L.:* «The Second Law of Thermodynamics» in: «Theoretical Physics and Philosophical Problems», englische Ausgabe von *McGuinness, B.*, D. Reidel Publ. Co, Dordrecht und Boston, 1974.

[10] *Danzin, A.:* «Rapport du CERD, 1re partie, Le Bilan Européen», 1976, S. 43.

[11] *Ladrière, J.:* «L'Abîme», in: «Savoir, Faire, Espérer: les Limites de la Raison», Tome I, Facultés Universitaires Saint-Louis, Bruxelles, 1976.

[12] Eines von vielen Beispielen: *Borel, E.:* «L'Evolution de la Mécanique», Flammarion, Paris, 1943.

[13] *Moser, J.:* «Stable and Random Motions in Dynamical Systems», Princeton University Press, Princeton, 1974.

[14] Siehe z.B. *d'Espagnat, B.:* «Conceptual Foundations of Quantum Mechanics, 2. Auflage, Benjamin, New York, 1976.

[15] *Prigogine, I., Grecos A., George C.:* «Kinetic Theory and Ergodic Properties», in: PNAS, 73, 1802–1805, 1976. Sowie Artikel in: J. Celestial Dynamics, 1977.

[16] *Rosenfeld, L.:* «The Measuring Process in Quantum Mechanics», in: «Supplement of the Progress of Theoretical Physics», 1965. *Prigogine I.:* «Time, Irreversibility and Structure», sowie: «Measurement Process and the Macroscopic Level of Quantum Mechanics», in: «The Physicist's Conception of Nature», D. Reidel Pub. Co, Dordrecht, 1973.

[17] *Bohr, N.:* «Physique Atomique et Connaissance Humaine», Gauthiers-Villars, Paris, 1972.

[18] *Heisenberg, W.:* «Physik und Philosophie», Hirzel, Stuttgart, 1959.

[19] *Prigogine, I., George Cl., Henin F., Rosenfeld L.:* «A Unified Formulation of Dynamics and Thermodynamics», Chemica Scripta, vol. 4, S. 5–32, 1973.

[20] *Glansdorff, P.* und *Prigogine I.:* «Structure, Stabilité et Fluctuation», Masson, Paris, 1971. – *Prigogine, I.* und *Nicolis, G.:* «Self-Organization in Non-Equilibrium Systems», Wiley, New York, 1977.

[21] *Monod, J.:*«Le Hasard et la Nécessité», Seuil, Paris, 1970.

[22] Ein solches Schlüsselwort ist der klassischen Auffassung von Wissenschaft fremd. Beispielhaft dafür: *Comte, A.:* «Cours de Philosophie Positive», Paris, Hermann, 1975.

[23] *Prigogine I., Allen, P.M., Herman, R.:* «The Evolution of Complexity and the Laws of Nature», Contribution to the 2nd Report (Goals for a Global Society), Club of Rome, erscheint 1977.

[24] *Allen, P.M.:* «Bulletin of Mathematical Biology, Vol. 37, 1975, Acad.Roy. Belg., Bull. Cl. Sci., S. 408–415, 1976.

[25] *Deneubourg, J.L.:* «Insectes Sociaux», vol. 4, S. 329–342, erscheint 1977. – *Deneubourg, J.L.* und *Allen, P.M.:* Acad. Roy. Belg., Bull. Cl. Sci., S. 416–429, 1976.

[26] *Allen, P.M., Deneubourg, J.L., Sanglier M.:* «Dynamicof Urban Growth Models», Bericht an das U.S. Transportation Department, 1977.

[27] *Whitehead, A.N.:* «Science and the Modern World», New York, McMillan, 1925.

[28] *Jantsch, E.:* Vorbereitender Text für ESIST. – Siehe auch: «Design for Evolution», Self-Organization and Planning in the Life of Human Systems, Braziller, New York, 1975.

[29] *Serres, M.:* «Estime», in: «La Distribution», Editions de Minuit, Paris, S. 290, 1977.