

Vorwort zu:

Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften *)

1.

Dieses Buch handelt von der Zeit. Sein Titel hätte lauten können: "Zeit, die vergessene Dimension". Ein solcher Titel würde vielleicht manchen Leser überraschen. Ist die Zeit nicht von Anfang an ein Bestandteil der Dynamik, der Erforschung der Bewegung? Geht es denn in der speziellen Relativitätstheorie nicht in erster Linie um die Zeit?

Das ist gewiß richtig. In der dynamischen Beschreibung, sei sie nun klassisch oder quantentheoretisch, kommt die Zeit jedoch nur in einem ganz eingeschränkten Sinne vor, insofern diese Gleichungen invariant gegenüber der Zeitumkehr $t \rightarrow -t$ sind. Gewiß scheint diese Zeitsymmetrie bei einer besonderen Art von Wechselwirkungen, der sogenannten superschwachen Wechselwirkung, verletzt zu sein, doch spielt diese Verletzung bei den Problemen, die Gegenstand dieser Arbeit sind, keine Rolle (siehe Kap. 1, Abschn. 2).

Die Eigentümlichkeit, daß die Zeit in der Dynamik lediglich als "geometrischer Parameter" erscheint, wurde bereits 1754 von d'Alembert bemerkt (d'Alembert, 1754). Lagrange ging sogar so weit, daß er die Dynamik über hundert Jahre vor den Arbeiten von Einstein und Minkowski als eine vierdimensionale Geometrie bezeichnete (Lagrange, 1796)! Nach dieser Auffassung spielen Zukunft und Vergangenheit ein und dieselbe Rolle. Die Weltlinien, die Bahnen oder Trajektorien, auf denen die Atome oder Teilchen, aus denen unsere Welt besteht, sich bewegen, können in die Zukunft oder in die Vergangenheit verfolgt werden.

Die Wurzeln dieser Vorstellung reichen bis zu den Anfängen der abendländischen Wissenschaft zurück (Sambursky, 1965). Die Schule von Milet, zu deren hervorragendsten Vertretern Thales gehörte, verband die Idee der Urmaterie mit dem Gesetz der Erhaltung der Materie. Da die Urmaterie für Thales aus einer einzigen Substanz (wie etwa Wasser) besteht, müssen alle Veränderungen in den physischen Erscheinungen, wie etwa Wachstum und Zerfall, bloße Illusionen sein.

Physiker und Chemiker wissen, daß eine Beschreibung, in der Vergangenheit und Zukunft die gleiche Rolle spielen, nicht für alle Erscheinungen gilt. Jeder kann beobachten, daß zwei Flüssigkeiten, die man in ein Gefäß schüttet, im allgemeinen zu einer homogenen Mischung diffundieren. Bei diesem Experiment ist die Richtung der Zeit wesentlich. Wir beobachten eine fortschreitende Homogenisierung, und die Einseitigkeit der Zeit wird darin sichtbar, daß wir nicht eine spontane Phasentrennung der beiden vermischten Flüssigkeiten beobachten. Derartige Erscheinungen wurden jedoch lange Zeit aus der fundamentalen Beschreibung der Physik ausgeschlossen. Man sah in ihnen eine Auswirkung von besonderen "unwahrscheinlichen" Anfangsbedingungen.

*) I. Prigogine, "Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften", Piper Verlag, 1979/1980(2)

Siehe auch: Interview in "Lettre International": http://www.lettre.de/archiv/45_prigogine.html

Wie wir in Kap. 1 sehen werden, schien zu Beginn dieses Jahrhunderts diese statische Auffassung der physikalischen Welt kurz vor ihrer Vollendung zu stehen, doch seit damals haben wir uns immer mehr von ihr entfernt. In fast allen Wissenschaftsbereichen herrscht heute eine dynamische Auffassung vor, in der die Zeit eine wesentliche Rolle spielt. Der Begriff der Evolution scheint für unser Verständnis der physikalischen Welt zentral zu sein. Dieser Begriff wurde im 19. Jahrhundert formuliert. Bemerkenswert ist, daß er damals, allerdings mit ganz unterschiedlicher spezifischer Bedeutung, nahezu gleichzeitig in der Physik, der Biologie und der Soziologie auftauchte. In die Physik wurde er durch den "Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik" eingeführt - das berühmte Gesetz von der Zunahme der Entropie, das einer der Hauptgegenstände dieses Buches ist.

Nach klassischer Auffassung drückte der Zweite Hauptsatz die Zunahme der molekularen Unordnung aus. Das thermodynamische Gleichgewicht entspricht, wie Boltzmann sagte, dem Zustand größter "Wahrscheinlichkeit". In Biologie und Soziologie hatte die Evolution jedoch gerade die entgegengesetzte Bedeutung. Sie beschrieb Veränderungen in Richtung auf gesteigerte Komplexität. Wie können wir diese verschiedenen Zeitbegriffe - Zeit als Bewegung, wie sie in der Dynamik benutzt wird, Zeit, wie sie in der Thermodynamik mit Irreversibilität verknüpft ist, Zeit als Geschichte wie in Biologie und Soziologie - miteinander in Verbindung bringen? Das ist offenbar nicht ganz einfach. Dennoch leben wir in einer einzigen Welt. Um zu einer zusammenhängenden Sicht der uns umgebenden Welt zu gelangen, müssen wir einen Weg finden, wie man von einer Beschreibung zur anderen übergeht.

2.

Es ist eines der wesentlichen Ziele dieses Buches, dem Leser meine Überzeugung zu vermitteln, daß wir in einer Zeit leben, in der sich eine wissenschaftliche Revolution vollzieht, bei der die Stellung und Bedeutung der wissenschaftlichen Betrachtungsweise eine grundlegende Neubewertung erfährt, einer Zeit, die dem Erwachen der wissenschaftlichen Betrachtungsweise bei den Griechen oder der Renaissance des wissenschaftlichen Denkens zu Zeiten Galileis nicht unähnlich ist.

Ganz sicher haben viele interessante und grundlegende Entdeckungen unseren wissenschaftlichen Horizont erweitert. Um nur einige zu nennen: die Quarks in der Elementarteilchen-Physik, merkwürdige Himmelsobjekte wie die Pulsare und der erstaunliche Fortschritt der Molekularbiologie. Dies sind Marksteine unserer Zeit, die an bedeutenden Entdeckungen besonders reich ist. Doch wenn ich von einer wissenschaftlichen Revolution spreche, denke ich an etwas anderes, etwas, das vielleicht weniger auffällig ist.

Seit den Anfängen der abendländischen Wissenschaft haben wir in dein Glauben an die "Einfachheit" des Mikroskopischen gelebt, was immer diese mikroskopische Beschreibung besagen mag: Moleküle, Atome, Elementarteilchen. Irreversibilität und Evolution erscheinen danach als Vorspiegelungen, die mit der Komplexität des kollektiven Verhaltens von an sich einfachen Objekten zusammenhängen. Diese Auffassung, die historisch eine der Triebkräfte der abendländischen Wissenschaft war, läßt sich heute kaum noch aufrechterhalten. Die uns bekannten Elementarteilchen sind komplexe Objekte, die erzeugt werden und zerfallen

können. Wenn es in der Physik und Chemie irgendwo Einfachheit gibt, dann nicht in den mikroskopischen Modellen. Eher liegt sie in den idealisierten makroskopischen Darstellungen, wie man sie etwa bei den einfachen Bewegungen wie dem harmonischen Oszillator oder dem Zweikörperproblem antrifft. Wenn immer wir von solchen Modellen aus ins Große oder ins Kleine gehen, hört diese Einfachheit auf, sobald wir aber nicht mehr an die Einfachheit des Mikroskopischen glauben, müssen wir die Rolle der Zeit neu überdenken. Wir kommen damit zur Hauptthese dieses Buches, die man folgendermaßen formulieren kann: Irreversible Prozesse sind erstens ebenso "real" wie reversible; sie entsprechen nicht irgendwelchen zusätzlichen Näherungen, die wir den zeitreversiblen Gesetzen überstülpen müßten. Zweitens spielen irreversible Prozesse eine fundamentale *konstruktive* Rolle in der physikalischen Welt; sie liegen bedeutsamen kohärenten Prozessen zugrunde, die mit besonderer Klarheit auf der biologischen Ebene zutage treten. Drittens ist die Irreversibilität tief in der Dynamik verankert. Man kann sagen, daß die Irreversibilität beginnt, wo die Grundbegriffe der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik (wie etwa Trajektorien oder Wellenfunktionen) aufhören, Observable zu sein. Irreversibilität entspricht nicht einer Zusatznäherung, die in die Gesetze der Dynamik ein. geführt wird, sondern einer Einbettung der Dynamik in einen umfassenderen Formalismus. Es gibt daher, wie wir zeigen werden, eine mikroskopische Formulierung, die über die konventionellen Formulierungen der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik hinausgeht und explizit die Rolle der irreversiblen Prozesse vor Augen führt.

Diese Auffassung führt zu einem vereinheitlichten Bild, das uns erlaubt, zahlreiche Aspekte unserer Beobachtungen von der Physik bis hin zur Biologie miteinander zu verknüpfen. Das heißt aber nicht, daß wir diese verschiedenen Gebiete auf ein einziges Schema "reduzieren" möchten. Unser Ziel wird vielmehr sein, die verschiedenen Ebenen der Beschreibung klar zu definieren und Bedingungen anzugeben, die es uns gestatten, von einer Ebene zur anderen überzugehen.

Die Rolle einer geometrischen Darstellung in der klassischen Physik ist wohl bekannt. Die klassische Physik beruht auf der euklidischen Geometrie, und die modernen Entwicklungen in der Relativitätstheorie und anderen Gebieten hängen eng mit Erweiterungen der geometrischen Begriffe zusammen. Betrachten wir jedoch das andere Extrem – die Feldtheorie, mit deren Hilfe Embryologen die komplexen Erscheinungen beschreiben, die mit der Morphogenese zusammenhängen. Es ist eine eindrucksvolle Erfahrung, besonders für einen Nichtbiologen, einen Film zu sehen, der die Entwicklung beispielsweise des Hühnerembryos beschreibt. Man erkennt die fortschreitende Organisation eines biologischen Raumes, in dem jedes Ereignis sich zu einem Zeitpunkt in einem räumlichen Gebiet so vollzieht, daß die Koordination des Prozesses als eines Ganzen möglich wird. Dieser biologische Raum ist ein funktionaler, nicht ein geometrischer Raum. Der übliche geometrische Raum, der euklidische Raum, ist invariant gegen Translationen oder Rotationen. Beim biologischen Raum ist das nicht der Fall. In diesem Raum sind die Ereignisse in Raum und Zeit lokalisierte Prozesse und nicht bloße Trajektorien. Wir kommen der aristotelischen Sicht des Kosmos ganz nahe (Sambursky, 1965). Wir wissen, daß Aristoteles der Welt der göttlichen und ewigen Trajektorien (Wege) die Welt der sublunaren Natur gegenüberstellte, deren Beschreibung offensichtlich von biologischen Beobachtungen beeinflusst war. Er schrieb: "Ohne Zweifel erfüllt uns die Schönheit der

Himmelskörper mit mehr Entzücken als die Betrachtung dieser niedrigen Dinge; denn die Sonne und die Sterne sind weder geboren noch vergehen sie, sondern sie sind ewig und göttlich. Aber die Himmel sind hoch und weit entfernt, und das Wissen, das unsere Sinne von den himmlischen Dingen liefern, ist dürftig und verschwommen. Die lebenden Geschöpfe sind dagegen vor unserer Tür, und wenn wir es wünschen, können wir reichliches und sicheres Wissen von jedem und allem erlangen. Wir erfreuen uns an der Schönheit einer Statue - wie soll nicht das Lebende uns mit Entzücken erfüllen; und das um so mehr, wenn wir im Geiste der Philosophie nach Ursachen suchen und das Vorliegen eines Planes erkennen. Dann werden das Ziel der Natur und ihre tief verborgenen Gesetze, die in ihrem mannigfaltigen Wirken sämtlich danach streben, diese oder jene Form des Schönen zu verwirklichen, allerorten enthüllt." (Aristoteles, De Partibus Animalium 1, 5, 644 b 31-645 a 4)

Gewiß war die Anwendung der biologischen Auffassungen des Aristoteles auf die Physik verheerend - wir beginnen jedoch, dank der modernen Theorie der Verzweigungen (Bifurkation) und Instabilitäten zu erkennen, daß die beiden Begriffe der geometrischen und der organisierten, funktionalen Welt nicht unvereinbar sind. Das ist ein Fortschritt, der, wie ich glaube, von bleibendem Einfluß sein wird.

3.

Der Glaube an die "Einfachheit" der mikroskopischen Ebene gehört inzwischen der Vergangenheit an. Es gibt jedoch einen weiteren Grund, warum ich überzeugt bin, daß wir uns inmitten einer wissenschaftlichen Revolution befinden. Die klassische, oft als "galileische" bezeichnete Wissenschaftsauffassung betrachtete die Welt als ein "Objekt" und versuchte, die physikalische Welt so zu beschreiben, als würde sie von außen als ein zu untersuchender Gegenstand, der uns nicht einschließt, gesehen. Diese Haltung ist in der Vergangenheit ungeheuer erfolgreich gewesen. Jetzt stoßen wir jedoch an die Grenze dieser galileischen Auffassung (Koyré, 1968). Um weitere Fortschritte zu erreichen, müssen wir unsere Position, den Standpunkt, von dem aus wir die physikalische Welt beschreiben, besser verstehen. Das heißt nicht, daß wir zu einer subjektivistischen Wissenschaftsauffassung zurückkehren müßten, doch müssen wir die physikalische Erkenntnis in einem gewissen Sinne mit den charakteristischen Merkmalen des Lebens in einen Zusammenhang bringen. Jacques Monod hat die lebenden Systeme "diese seltsamen Objekte" genannt (Monod, 1970) verglichen mit der "unbelebten" Welt sind sie in der Tat sehr seltsam. Es wird eines der Hauptthemen unserer Untersuchung sein, zumindest zu versuchen, einige allgemeine Merkmale dieser Objekte zu entwirren. In der Molekularbiologie ist ein grundlegender Fortschritt erzielt worden, und ohne ihn wäre unsere Erörterung nicht möglich gewesen. Wir möchten jedoch andere Gesichtspunkte unterstreichen, und darunter sollen insbesondere zwei im Detail erörtert werden: Erstens sind lebende Objekte weit vom Gleichgewicht entfernte Gebilde, die durch Instabilitäten von der Welt des Gleichgewichts getrennt sind; außerdem sind lebende Objekte notwendig "große" makroskopische Objekte, die einen kohärenten Zustand der Materie voraussetzen, der notwendig ist, um die komplexen Biomoleküle hervorzubringen, welche die Fortsetzung des Lebens ermöglichen.

Dies sind generelle Merkmale, die einbezogen werden müssen in die Antwort auf die Frage: "Welche Bedeutung hat unsere Beschreibung der physikalischen Welt, d.h. von welchem Standpunkt aus beschreiben wir sie?" Die Antwort kann nur lauten, daß wir von einer makroskopischen Beschreibung ausgehen und daß sich sämtliche Ergebnisse unserer Messungen auch in der mikroskopischen Welt an irgendeinem Punkt auf die makroskopische Beschreibung zurückbeziehen. Es gibt, wie Bohr betont hat, *primitive* Begriffe; diese Begriffe sind nicht a priori bekannt, aber von jeder Beschreibung muß gezeigt werden, daß sie mit ihnen vereinbar ist (Bohr, 1948). Das bringt ein Element der Selbstkonsistenz in unsere Beschreibung der physikalischen Welt. Lebende Systeme haben zum Beispiel einen Sinn für die Zeitrichtung. Das wird schon durch Experimente an den einfachsten einzelligen Organismen deutlich. Diese Richtung der Zeit wäre einer dieser "ursprünglichen Begriffe". Ohne sie wäre keine Wissenschaft, sei es nun von zeitlich umkehrbarem Verhalten, wie in der Dynamik, oder von irreversiblen Prozessen, möglich. Es ist deshalb einer der interessantesten Aspekte der Theorie von den dissipativen Strukturen, die wir in den Kapiteln IV und V entwickeln werden, zu zeigen, daß diese Richtung der Zeit in den Grundlagen von Physik und Chemie verankert ist. Dieses Ergebnis rechtfertigt seinerseits in selbstkonsistenter Weise den Sinn für Zeit, den wir uns selbst zugeschrieben haben. Der Begriff der Zeit ist weitaus komplexer, als wir glaubten. Die mit der Bewegung verknüpfte Zeit war lediglich der erste Aspekt, der sich konsistent in den Rahmen von theoretischen Strukturen wie etwa die klassische Mechanik oder die Quantenmechanik einbauen ließ.

Wir können darüber hinausgehen. Eines der eindrucksvollsten neuen Ergebnisse, die wir in diesem Buch darstellen werden, ist das Auftauchen einer "zweiten Zeit", einer Zeit, die tief in den Schwankungen auf mikroskopischer, dynamischer Ebene verwurzelt ist. Diese neue Zeit ist nicht mehr ein bloßer Parameter, ein mit der klassischen oder Quantenmechanik verknüpfter "Index", sondern sie ist so etwas wie ein Operator in der Quantenmechanik! Warum wir Operatoren benötigen, um die unerwartete Komplexität der mikroskopischen Ebene zu beschreiben, ist einer der interessantesten Aspekte der Entwicklung, die wir in diesem Buch beschreiben werden.

4.

Vielleicht führt die neuere Entwicklung der Wissenschaft dazu, daß die wissenschaftliche Betrachtungsweise stärker in die abendländische Kultur integriert wird. Ungeachtet all ihrer Erfolge hat die Entwicklung der Wissenschaft zweifellos auch zu gewissen Spannungen innerhalb der Kultur geführt (Snow, 1964). Daß es "zwei Kulturen" gibt, liegt nicht allein daran, daß man sich zu wenig füreinander interessiert; es rührt zumindest teilweise auch daher, daß die naturwissenschaftliche Methode über Probleme wie Zeit und Wandel, die in der Literatur und Kunst so wesentlich sind, so wenig zu sagen hatte. Solche allgemeinen Probleme, welche die Philosophie und die Humanwissenschaften berühren würden, werden wir in dieser Arbeit nicht diskutieren. Einige dieser Probleme werde ich zusammen mit meiner Kollegin Isabelle Stengers in einem anderen Buch untersuchen. Interessant ist jedoch, daß es sowohl in Europa als auch in den Vereinigten Staaten eine starke Tendenz gibt, philosophische und wissenschaftliche Themen enger miteinander zu verknüpfen. Als Beispiele seien in Frankreich die Arbeiten von Serres, Moscovici, Morin und anderen genannt; in Amerika etwa der provozierende Artikel von Robert Brustein "Drama in the Age of

Einstein" in der *New York Times* vom 7. August 1977, in dem die Rolle der Kausalität in der Literatur einer neuen Beurteilung unterzogen wird.

Es ist vermutlich nicht übertrieben, wenn man sagt, daß die westliche Zivilisation zeitzentriert ist. Vielleicht hängt das bereits mit einem Grundmerkmal der Betrachtungsweise sowohl des Alten wie des Neuen Testaments zusammen. Auf jeden Fall mußte die "zeitlose" Konzeption der klassischen Physik mit den metaphysischen Konzeptionen des Abendlandes zusammenstoßen. Nicht zufällig war die ganze Geschichte der Philosophie von Kant bis Whitehead ein Versuch, diese Schwierigkeit entweder durch die Einführung einer anderen Realität (beispielsweise der noumenalen Welt Kants) oder durch eine neue Darstellungsweise zu eliminieren, in der die Zeit und die Freiheit im Gegensatz zum Determinismus eine fundamentalere Rolle spielen würden. Wie dem auch sei, Probleme der Zeit und des Wandels sind in der Biologie und der soziokulturellen Entwicklung von wesentlicher Bedeutung. Es gehört gerade zu den faszinierenden Aspekten kultureller und sozialer Veränderungen, daß sie sich im Unterschied zu biologischen innerhalb kurzer Zeitabschnitte vollziehen. Daher muß sich in einem gewissen Sinne jeder, der an kulturellen und sozialen Aspekten interessiert ist, in der einen oder anderen Weise dem Problem der Zeit und den Gesetzen des Wandels stellen, und vielleicht kann umgekehrt jeder, der am Problem der Zeit interessiert ist, nicht umhin, auch ein gewisses Interesse an den kulturellen und sozialen Wandlungen unserer Zeit zu nehmen.

Die klassische Physik hat uns, selbst wenn man sie um die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie erweitert, nur ziemlich dürftige Modelle der zeitlichen Entwicklung geliefert. Die deterministischen Gesetze der Physik, die man einmal für die einzigen Gesetze hielt, welche der menschliche Geist akzeptieren kann, erscheinen uns heute als grobe Vereinfachungen, beinahe als eine Karikatur der Evolution. In der klassischen wie in der Quantenmechanik schien es, daß, wenn man den Zustand eines Systems zu einer gegebenen Zeit hinreichend genau "kennt", die Zukunft (wie auch die Vergangenheit) zumindest im Prinzip vorhergesagt werden kann. Natürlich haben wir es hier mit einem theoretischen Problem zu tun, denn tatsächlich wissen wir, daß wir noch nicht einmal vorhersagen können, ob es in, sagen wir einem Monat regnen wird. Immerhin scheinen unsere gewohnten theoretischen Vorstellungen zu besagen, daß die Gegenwart gewissermaßen die Vergangenheit und die Zukunft bereits "enthält". Wir werden sehen, daß dem nicht so ist. Insbesondere ist die Zukunft nicht in der Vergangenheit enthalten. Auch in der Physik können wir - wie in der Soziologie - lediglich verschiedene mögliche "Szenarios" vorhersagen. Das ist jedoch gerade der Grund, warum wir an einem faszinierenden Abenteuer beteiligt sind, bei dem wir, um die berühmten Worte von Niels Bohr zu wiederholen, sowohl Zuschauer als auch Handelnde sind.

5.

Diese Monographie ist auf einem mittleren Niveau gehalten. Sie verlangt eine gewisse Kenntnis der wichtigsten Methoden der theoretischen Physik und Chemie. Ich hoffe indessen, durch die Wahl dieses Niveaus einer großen Gruppe von Lesern eine einfache Einführung in einen Bereich, der nach meiner Ansicht eine große Faszinationskraft und weitreichende Implikationen besitzt, geben zu können.

Diese Arbeit gliedert sich folgendermaßen: Nach einem einleitenden Kapitel biete ich einen kurzen Überblick über das, was man als Physik des "Seins" bezeichnen könnte (klassische Mechanik und Quantenmechanik). Ich hebe vor allem die Grenzen der klassischen und der Quantenmechanik hervor, um dem Leser meine Überzeugung zu vermitteln, daß diese Bereiche weit davon entfernt sind, abgeschlossen zu sein, und sich in einer raschen Entwicklung befinden. Befriedigende Kenntnisse besitzen wir in der Tat nur, soweit es um die einfachsten Probleme geht. Leider beruhen die allgemein verbreiteten Vorstellungen über den Aufbau der Wissenschaft vielfach auf einer unzulässigen Extrapolation aus diesen einfachen Situationen. Anschließend gehen wir zur Physik des "Werdens" über, zur Thermodynamik in ihrer modernen Form, zur Erscheinung der Selbstorganisation und zur Rolle der Fluktuationen. Drei Kapitel befassen sich mit den Methoden, die es gegenwärtig erlauben, eine Brücke vom Sein zum Werden zu bauen; sie behandeln insbesondere die kinetische Theorie und ihre neueren Entwicklungen. Lediglich Kapitel VIII enthält ziemlich anspruchsvolle mathematische Überlegungen, die in den Anhängen noch ausführlicher dargestellt sind. Leser, die nicht die nötigen Vorkenntnisse besitzen, können direkt zu Kapitel IX übergehen, in dem die wichtigsten Schlußfolgerungen, die in Kapitel VIII entwickelt werden, zusammengefaßt sind. Die wohl bedeutsamste Schlußfolgerung ist, daß die Irreversibilität dort beginnt, wo die klassische und die Quantenmechanik aufhören. Das heißt nicht, daß die klassische und die Quantenmechanik falsch würden - sie entsprechen dann jedoch Idealisierungen, die über die begrifflichen Möglichkeiten der Beobachtung hinausgehen. Trajektorien oder Wellenfunktionen haben nur dann einen physikalischen Sinn, wenn wir ihnen eine Beobachtung zuordnen können - das ist nicht mehr der Fall, wenn die Irreversibilität zum Bestandteil des physikalischen Bildes wird.

Wir bieten so einen Überblick über einige der Probleme, die als Einführung in ein tieferes Verständnis der Zeit und des Wandels dienen können. Spezielle Kenntnisse sind dafür nicht erforderlich. Sämtliche Literaturhinweise wurden am Ende dieses Buches zusammengefaßt. Wir haben einige wichtige Quellen angeführt, in denen der interessierte Leser weitere Entwicklungen finden mag, außerdem Originalveröffentlichungen, die im Zusammenhang mit diesem Buch von besonderem Interesse sind. Die Auswahl ist - zugegeben - recht willkürlich, und der Leser wird es vielleicht entschuldigen, wenn ich etwas ausgelassen habe. Von besonderer Bedeutung für die in der vorliegenden Arbeit behandelten Probleme sind zwei Bücher: eines von G. Nicolis und dem Verfasser ("Selforganization in Non-Equilibrium Systems", 1977) und ein weiteres des Verfassers ("The Microscopic Theory of Irreversible Processes"), das 1980 erscheinen wird. Die allgemeinen - *die philosophischen* - Implikationen der in diesem Buch diskutierten Ideen sind Gegenstand einer gesonderten Monographie von I. Stengers und dem Verfasser, in französischer Fassung "La Nouvelle Alliance", die in deutscher Fassung 1980 im Piper-Verlag erscheinen wird.

6.

Im Vorwort zur englischen Ausgabe seiner "Logik der Forschung" von 1959 schrieb Karl Popper: "Ich glaube jedoch, daß es zumindest *ein* philosophisches Problem gibt, das alle denkenden Menschen interessiert. Es ist das Problem der Kosmologie: das Problem, die Welt zu verstehen - auch uns selbst und unser Wissen als einen Teil dieser Welt". Die vorliegende Arbeit möchte deutlich machen, daß neuere

Entwicklungen in Physik und Chemie einen Beitrag zu dem Problem geleistet haben, das Popper so schön formuliert hat.

Wie bei allen bedeutsamen wissenschaftlichen Entwicklungen gibt es auch hier ein Element der Überraschung. Wir sind es gewohnt, in der Welt des Kleinen oder des Großen auf vollkommen unerwartete Erscheinungen zu stoßen. Das neue Überraschungselement besteht nun darin, daß der Begriff der Irreversibilität eine Revision der grundlegenden Methoden von Physik und Chemie wie etwa der klassischen und der Quantenmechanik nach sich zieht. Die Irreversibilität führt unerwartete Merkmale ein, die, richtig verstanden, den Schlüssel für den Übergang vom Sein zum Werden liefern.

Seit den Anfängen der abendländischen Wissenschaft ist das Problem der Zeit eine Herausforderung gewesen. Es steht in engem Zusammenhang mit der Newtonschen Revolution, und es hat die Arbeit Boltzmanns inspiriert. Die Herausforderung besteht für uns noch immer, aber vielleicht sind wir einer Zusammenschau näher gekommen, aus der sich wahrscheinlich in der Zukunft wieder neue Entwicklungen ergeben werden.

Ilya Prigogine [*]

Kapitel IX : Die Gesetze des Wandels

1. Einsteins Dilemma

Ich schreibe dieses Kapitel im Jahre 1979, hundert Jahre nach der Geburt Einsteins. Niemand hat mehr zur statistischen Theorie der Materie und insbesondere zur Theorie der Schwankungen beigetragen als Einstein. Dafür seien einige herausragende Beispiele genannt. Durch Umkehrung der Boltzmannschen Formel (1.10) gelangte Einstein zur Wahrscheinlichkeit eines makroskopischen Zustandes, die durch die mit diesem Zustand verbundene Entropie ausgeschmückt wird. Es hat sich gezeigt, daß dieser Schritt für die gesamte makroskopische Theorie der Schwankungen (die in der Nachbarschaft kritischer Punkte von besonderem Interesse ist) von ausschlaggebender Bedeutung war. Einsteins Beziehung ist eine der Grundlagen im Beweis der Onsager-schen Reziprozitätsbeziehung (IV.20).

Einsteins Beschreibung der Brownschen Bewegung, wie sie in Kapitel I, Abschnitt 3 zusammengefasst ist, lieferte eines der ersten Beispiele für "Zufallsprozesse". Selbst heute ist ihre Bedeutung bei weitem nicht ausgeschöpft. Die modellhafte Darstellung von chemischen Reaktionen durch Markow-Ketten in Kapitel VI folgt noch immer seinem Gedankengang.

Schließlich war es Einstein, der als erster die allgemeine Bedeutung der Planckschen Konstante h erkannte, die zum Welle-Teilchen-Dualismus führt. Einstein ging es um die elektromagnetische Strahlung. Doch etwa zwanzig Jahre später übertrug de Broglie Einsteins Beziehungen auf die Materie. Heisenberg, Schrödinger und andere gaben diesen Ideen eine mathematische Fassung. Wenn aber die Materie sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter hat, wird die vom klassischen Determinismus vertretene Idee der Trajektorie zunichte. Deshalb bedient sich die Quantentheorie, wie wir gesehen haben (siehe Kapitel III und Anhang D), statistischer Überlegungen. Einstein widersetzte sich jedoch sein Leben lang der Idee, dass derartige statistische Beschreibungen einer objektiven Eigenschaft der Natur entsprechen könnten. Dazu möchte ich einen sehr bekannten Brief Einsteins an Born zitieren (A. Einstein und M. Born, 1969, S. 204): "Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an volle Gesetzlichkeit in einer Welt von etwas objektiv Seiendem, das ich auf wild spekulativem Wege zu erhaschen suche. Ich *glaube* fest, aber ich hoffe, dass einer einen mehr realistischen Weg, bzw. eine mehr greifbare Unterlage finden wird, als es mir gegeben ist. Der große anfängliche Erfolg der Quantentheorie kann mich doch nicht zum Glauben an das fundamentale Würfelspiel bringen, wenn ich auch wohl weiß, dass die jüngeren Kollegen dies als Folge der Verkalkung auslegen."

Warum hat Einstein zu den Fragen von Zeit und Zufall eine derart starre Haltung eingenommen? Warum hat er gegenüber jedem Kompromiss in diesen Fragen die geistige Isolation vorgezogen?

Eines der bewegendsten Dokumente über Einstein ist die Sammlung von Briefen, die Einstein mit seinem alten Freund Michele Besso wechselte. Einstein war, was ihn selbst betraf, gewöhnlich sehr zurückhaltend, aber Besso war ein ganz besonderer Fall. Sie lernten einander sehr früh in Zürich kennen, als Einstein 17 und Besso 23 Jahre alt war. Besso kümmerte sich um die erste Frau und die Kinder Einsteins, als dieser bereits in Berlin arbeitete, während seine Familie weiterhin in Zürich lebte. Zwischen Besso und Einstein gab es eine tiefe Zuneigung. Dennoch gingen ihre Interessen mit der Zeit auseinander. Besso ging es mehr und mehr um Literatur und Philosophie, ja vielleicht um den Sinn des menschlichen Daseins. Er wusste, dass er, um eine Antwort von Einstein zu bekommen, wissenschaftliche Probleme anschneiden musste, doch

* aus: Ilya Prigogine, Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften R. Piper & Co, München, ²1980.

seine Interessen schlugen zunehmend eine andere Richtung ein. Die Freundschaft zwischen ihnen hielt ihr ganzes Leben lang, und Besso sollte nur wenige Monate vor Einstein im Jahre 1955 sterben. Für uns ist hier vor allem der letzte Teil des Briefwechsels zwischen 1940 und 1955 von Belang.

Dort kommt Besso immer wieder auf das Problem der Zeit zurück. Was ist Irreversibilität? Wie hängt sie mit den grundlegenden Gesetzen der Physik zusammen? Und geduldig antwortet Einstein immer wieder, dass Irreversibilität eine Illusion sei, ein subjektiver Eindruck, der von ungewöhnlichen Anfangsbedingungen herrühre. Besso bleibt unbefriedigt. Seine letzte wissenschaftliche Arbeit ist ein Beitrag für die in Genf erscheinenden *Archives des Sciences*. Im Alter von 80 Jahren legte er dort einen Versuch vor, die allgemeine Relativitätstheorie mit der Irreversibilität der Zeit zu versöhnen. Einstein ist mit diesem Versuch nicht zufrieden; er schreibt: "..., dass Du dich ganz erheblich auf's Glatteis gewagt hast, Soweit unsere mehr direkte Kenntnis der Elementar-Vorgänge existiert, gibt es zu jedem Vorgang dessen Umkehrung Im Elementaren gibt es zu jedem Vorgang den inversen Du kannst Dich nicht an den Gedanken gewöhnen, dass die subjektive Zeit mit ihrem "Jetzt" keine objektive Bedeutung haben soll."

Besso stirbt. In einem bewegenden Brief an seine Schwester und seinen Sohn schreibt Einstein: "Nun ist er mir auch mit dem Abschied von dieser sonderbaren Welt ein wenig vorausgegangen. Dies bedeutet nichts. Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion." (A. Einstein, M. Besso, 1972, S. 499f und S. 538)

Einstein glaubte an den Gott Spinozas, einen mit der Natur gleichgesetzten Gott, einen Gott von höchster Rationalität. In dieser Konzeption ist kein Raum für eine freie Schöpfung, für Kontingenz, für menschliche Freiheit. Jede Kontingenz, jede Zufälligkeit, die es scheinbar geben mag, ist nur ein Schein. Wenn wir glauben, in unseren Handlungen frei zu sein, so nur, weil wir ihre wahren Ursachen nicht kennen.

Wo stehen wir heute? Ich glaube, dass der wichtigste Fortschritt, den wir erreicht haben, darin besteht, dass wir allmählich erkennen, dass Wahrscheinlichkeit nicht unbedingt mit Unwissenheit zu tun hat, dass der Abstand zwischen der deterministischen und der probabilistischen Beschreibung weniger groß ist, als die meisten Zeitgenossen Einsteins und Einstein selber glaubten. Schon Poincaré ("Le Hasard"... 1914) hatte dargelegt, dass wir, wenn wir würfeln und zur Vorhersage des Ergebnisses Wahrscheinlichkeiten verwenden, damit nicht sagen wollen, dass das Konzept der Trajektorien ungültig sei, sondern nur, dass das System derart beschaffen ist, dass es in jedem Intervall von Anfangsbedingungen, so klein es auch sein mag, ebenso viele Trajektorien gibt, die zu jeder Seite des Würfels führen. Dies ist eine einfache Formulierung des Problems der dynamischen Instabilität, das wir wiederholt erörtert haben (siehe Kapitel II, III, VII und VIII). Bevor wir erneut darauf zurückkommen, wollen wir einen Überblick über die von uns beschriebenen Gesetze der Veränderung geben.

2. Zeit und Veränderung

Bereits in Kapitel I haben wir die Methoden vorgestellt, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden, um die Veränderung zu beschreiben. Grundsätzlich lassen sich drei Klassen unterscheiden: makroskopische Methoden, die sich mit der Entwicklung von Mittelwerten befassen, wie etwa Fouriers Gesetz, die chemische Kinetik usw., stochastische Methoden wie die Theorie der Markow-Ketten und die klassische oder die Quantenmechanik.

Während der letzten Jahre sind einige ganz unerwartete Gesichtspunkte aufgetaucht. Zunächst die überraschende Vielfalt der makroskopischen Beschreibung, insbesondere von nicht-linearen, weit vom Gleichgewicht entfernten Systemen.

Ein guter Beleg dafür sind die in Kapitel V erörterten Reaktions-Diffusions-Gleichungen. Selbst einfache Beispiele können zu aufeinander folgenden Verzweigungen und zu verschiedenen Raum-Zeit-Strukturen führen. Dies schränkt die Einheitlichkeit der makroskopischen Beschreibung drastisch ein und zeigt außerdem, dass die makroskopische Beschreibung allein keine konsistente Darstellung der zeitlichen Entwicklung liefern kann. Die verschiedenen Zweige, wie sie etwa in Abb. V.2 dargestellt sind, erfüllen ja alle die entsprechenden Randbedingungen (dies im Gegensatz zu den klassischen Problemen in der Potentialtheorie, wo es für gegebene Randbedingungen nur eine einzige Lösung gibt). Außerdem liefern uns die makroskopischen Gleichungen nicht die notwendige Information darüber, was an den Verzweigungspunkten geschieht. Welcher Teil der Systeme folgt einer bestimmten Verzweigungsgeschichte?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir auf die stochastische Theorie zurückgreifen, etwa auf Markow-Ketten. Aber auch hier treten neuartige Erscheinungen auf. Von besonderem Interesse ist die enge Beziehung zwischen Schwankungen und Verzweigungen (siehe Kapitel VI), die zu tief greifenden Abänderungen der klassischen Ergebnisse der statistischen Theorie führt. Das Gesetz der großen Zahl ist in der Nähe von Verzweigungen nicht mehr gültig, und die strenge Eindeutigkeit der Lösung von Master-Gleichungen für die Wahrscheinlichkeitsverteilung geht verloren (siehe Kapitel VI, Abschnitt 3).

Dennoch besteht zwischen stochastischen und makroskopischen Methoden eine klare Beziehung. Gerade dann, wenn die Mittelwerte von Größen keine geschlossenen Gleichungen erfüllen, wie es in der Nähe von Verzweigungspunkten der Fall ist, müssen wir den ganzen Apparat der statistischen Theorie anwenden. Die Beziehung zwischen den makroskopischen oder stochastischen Methoden einerseits und den dynamischen Methoden andererseits bleibt ein herausforderndes Problem. Dieses Problem ist, wie wir bemerkt haben, in der Vergangenheit von zahlreichen Standpunkten aus erörtert worden. So unterschied beispielsweise Arthur Eddington in seinem schönen Buch "The Nature of the Physical World" (1958, S. 75) zwischen "primären Gesetzen", die das Verhalten von Einzelindividuen bestimmen, und "sekundären Gesetzen" wie dem Prinzip der Entropiezunahme, die nach der klassischen Auffassung nur auf Gesamtheiten von Atomen oder Molekülen anwendbar wären.

Eddington erkannte durchaus die Bedeutung der Entropie. Er schrieb: "Vom Standpunkt der Wissenschaftslehre aus muss die mit der Entropie verbundene Begriffsbildung, wie ich glaube, als der große Beitrag des neunzehnten Jahrhunderts zum wissenschaftlichen Denken eingestuft werden. Sie bezeichnete ein Abgehen von der Auffassung, dass alles, was für die Wissenschaft von Belang ist, durch eine mikroskopische Zerlegung von Objekten entdeckt wird." (a.a.O., S. 103)

Wie können nun nebeneinander "primäre" und "sekundäre" Gesetze bestehen? "Man wäre nicht überrascht", schreibt Eddington, "wenn bei der Rekonstruktion der physikalischen Theorie, welche die Quantengesetze uns jetzt aufzwingt, das sekundäre Gesetz zur Grundlage würde und das primäre Gesetz aufgegeben werden müsste." (a.a.O., S. 98)

Sicherlich spielt die Quantentheorie eine Rolle, da sie uns zwingt, die Vorstellung von klassischen Trajektorien aufzugeben. Aber unter dem Gesichtspunkt des Zusammenhangs mit dem Zweiten Hauptsatz scheint uns vor allem der Begriff der Instabilität, den wir wiederholt erörtert haben, von grundlegender Bedeutung zu sein.

Gerade die Struktur der Gleichungen, die "Zufälligkeit" auf mikroskopischem Niveau einschließt, macht sich dann auf makroskopischem Niveau als Irreversibilität bemerkbar. In diesem Sinne hat schon Poincaré die Bedeutung der Irreversibilität vorweggenommen, als er schrieb: "In normaler Sprache ausgedrückt und zusammengefasst kann das Gesetz von der Erhaltung der Energie (oder das Clausiussche Prinzip von der Zunahme der Entropie) nur eine Bedeutung haben, nämlich die, dass es eine allen möglichen Fällen gemeinsame Eigenschaft gibt; aber nach

der deterministischen Hypothese gibt es nur eine einzige Möglichkeit, und dann hat das Gesetz keine Bedeutung mehr. Nach der indeterministischen Hypothese würde es andererseits eine Bedeutung erhalten, sogar wenn man es in absolutem Sinne verstehen wollte; das Gesetz würde dann aber als eine unserer Freiheit gesetzte Grenze erscheinen. Aber letzteres Wort erinnert mich daran, daß ich abweiche und im Begriffe bin, den Bereich zu verlassen, der durch Mathematik und Physik beschrieben wird." (Poincaré, 1906).

Poincarés Vertrauen auf eine grundsätzlich deterministische Beschreibung war noch zu fest gefügt, als dass er eine statistische Beschreibung der Natur ernsthaft erwogen hätte. Für uns sieht die Situation ganz anders aus. Viele Jahre, nachdem das geschrieben wurde, ist unser Vertrauen in die deterministische Naturbeschreibung sowohl auf mikroskopischem wie auf makroskopischem Niveau erschüttert. Wir weichen nicht mehr entsetzt vor solchen kühnen Schlußfolgerungen zurück!

Mehr noch: Wir sehen, dass unsere Betrachtungsweise die Folgerungen von Boltzmann und Poincaré in einem gewissen Sinne miteinander verbindet. Boltzmann, der wagemutige, revolutionäre Physiker, dessen Denken auf einer ungewöhnlichen physikalischen Intuition beruhte, erahnte den Gleichungstyp, der die Entwicklung der Materie auf der mikroskopischen Ebene beschreiben und trotzdem irreversible Prozesse darstellen könnte. Poincaré mit seiner tiefen mathematischen Einsicht konnte mit lediglich intuitiven Argumenten nicht zufrieden sein, aber er erkannte klar die Richtung, in der allein eine Lösung gefunden werden könnte. Wir glauben, dass die Methoden, die wir in dieser Monographie dargestellt haben (siehe Kapitel VII und VIII sowie den Anhang), die Verbindung zwischen den großen intuitiven Bemühungen Boltzmanns und Poincarés Forderung der strengen mathematischen Formulierung herstellen.

Diese mathematische Formulierung führt uns zu einem neuen Begriff der Zeit und der Irreversibilität, dem wir uns nun zuwenden.

3. Zeit und Entropie als Operatoren

Ein Großteil von Kapitel VII war einigen der bedeutsamsten Bemühungen gewidmet, die bislang angestrengt wurden, um die Entropie auf der mikroskopischen Ebene zu definieren. Wir sind ein wenig ausführlicher auf Boltzmanns grundlegenden Beitrag zu diesem Thema eingegangen, der in seiner Entdeckung der IC-Funktion (VII. 7) gipfelt. Ungeachtet anders lautender Bemerkungen kann man jedoch Boltzmanns \mathcal{H} -Theorem – und hierin muss man Äußerungen von Poincaré recht geben – nicht als aus der Dynamik "abgeleitet" bezeichnen. Boltzmanns kinetische Gleichung, auf welche die Ableitung des JC-Theorems sich stützt, besitzt *nicht* die Symmetrie der klassischen Dynamik (siehe Kapitel VII, Abschnitt 2, und Kapitel VIII, Abschnitt 2). Trotz ihrer historischen Bedeutung ist sie bestenfalls als ein phänomenologisches Modell aufzufassen.

Auch die Ensembletheorie bringt uns nicht voran, selbst wenn man sie dadurch erweitert, dass man der Entropie eine mikroskopische Funktion (in der klassischen Mechanik bzw. einen hermiteschen Operator in der Quantenmechanik) zuordnet. Diese negativen Schlussfolgerungen wurden in Kapitel VII, Abschnitte 4-5 dargestellt.

Danach bleiben uns sehr wenige Möglichkeiten, es sei denn, wir würden uns der Auffassung anschließen, dass die Irreversibilität auf Fehler zurückzuführen ist oder auf Hilfsnäherungen, die man der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik hinzufügt.

Mittlerweile ist jedoch ein anderer, vollständig verschiedener Ansatz sichtbar geworden: Die Idee, der makroskopischen Entropie (oder Ljapunow-Funktion) einen mikroskopischen, Entropie-Operator zuzuordnen, den wir \mathbf{M} genannt haben.^[1]

Das ist natürlich ein sehr bedeutsamer Schritt: Wir waren es gewohnt, Observable in der klassischen Mechanik als Funktion von Koordinaten und Impulsen aufzufassen. Dennoch hatte schon die Einführung des Liouville-Operators \mathbf{L} in die klassische und die quantentheoretische Ensembletheorie (siehe Kapitel II bis III) uns gleichsam auf diesen neuen Schritt vorbereitet, der etwas ganz anderes bedeutet. Die Ensembletheorie wurde nämlich als eine "Näherung" aufgefasst, während sich die "eigentliche" Theorie mit Trajektorien oder Wellenfunktionen befaßte. Mit der Einführung des Operators \mathbf{M} ändert sich die Situation nun völlig. Jetzt wird die Beschreibung durch Bündel von Trajektorien, oder durch Verteilungsfunktionen grundlegend, und eine weitergehende Reduktion auf *einzelne Trajektorien oder Wellenfunktionen* ist nicht mehr möglich.

Wir haben die physikalische Bedeutung der Entropie und der Zeit als Operatoren in den Kapiteln VII und VIII sowie in den Anhängen A und C erörtert. (Siehe insbesondere Kap. VII, Abschn. 1 und 6, Kap. VIII, Abschn. 1,3 und 6.) Da Operatoren erstmals durch die Quantenmechanik in die Physik eingeführt wurden, besteht in der Vorstellung der meisten Wissenschaftler noch immer ein enger Zusammenhang zwischen der mit der Planckschen Konstante h verbundenen Quantisierung und dem Auftreten von Operatoren. Die Verknüpfung von Operatoren mit physikalischen Größen hat jedoch eine umfassendere Bedeutung und ist insbesondere von der Quantisierung ganz unabhängig. Sie bedeutet eigentlich, dass aus irgendeinem Grund die klassische Beschreibung im Sinne von Trajektorien entweder aufgrund von Instabilität und Zufälligkeit auf dem mikroskopischen Niveau (siehe Anhang A) oder aufgrund von Quanten-"Korrelationen" (siehe Anhang D) aufgegeben werden muss.

Für die klassische Mechanik können wir die Situation folgendermaßen darstellen (siehe Abb. IX1).

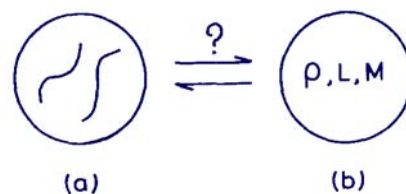


Abb. IX.1 Mechanische Beschreibung und Beschreibung in der statistischen Mechanik:

- (a) Trajektorien und Hamilton-Funktion H ;
- (b) Verteilungsfunktionen ρ , Liouville-Operator \mathbf{L} und Entropie-Operator \mathbf{M} .

Die gewöhnliche Beschreibung (a) bezieht sich auf Trajektorien oder Bahnen, die durch Hamilton-Gleichungen (II.4) bestimmt werden. Die andere Beschreibung (b) bezieht sich auf Verteilungsfunktionen (II.8), deren Veränderung durch den Liouville-Operator bestimmt ist. Diese beiden Beschreibungen können nur dann verschieden sein, wenn es uns nicht in jedem Augenblick gelingt, von der einen zur anderen Beschreibung überzugehen. Physikalische Gründe, warum es sich so verhalten könnte, haben wir in Kapitel II, Abschnitt 8 erörtert. Experimente, die mit beliebiger, aber endlicher Genauigkeit durchgeführt würden, führen uns lediglich zur Bestimmung eines *endlichen* Gebietes des Phasenraums, in dem das System lokalisiert sein

¹ Unter historischem Gesichtspunkt ist es interessant, dass wir zunächst die nicht-unitäre Transformation Λ fanden, die von der gewöhnlichen Liouville-Gleichung zu den kinetischen Gleichungen führt (siehe Kapitel VIII, Abschnitt 2). Erst vor kurzem wurde uns die Bedeutung dieses Schrittes klar: nämlich, dass es in der ursprünglichen (Hamiltonschen) Darstellung einen weiteren Operator \mathbf{M} gibt und dass daher in diesem Sinne die gewöhnliche dynamische Beschreibung nicht vollständig war.

kann. Die Frage ist dann, ob wir, wie es schematisch in Abb. IX.2 angedeutet ist, wenigstens im Prinzip einen Grenzübergang durchführen können, der Prozesse aus diesem Gebiet auf einen Punkt P begrenzt – die örtliche Verteilung würde dann durch eine δ -Funktion beschrieben – so dass eine wohl definierte Bahn zustande käme.

Diese Frage hängt natürlich mit dem Problem der schwachen Stabilität zusammen, das wir schon in Kapitel II erörterten. Der Grenzprozess lässt sich sicher nicht durchführen, wenn wir in jedem Phasenraumgebiet, *so klein es auch sein mag*, eine Vielzahl von Trajektorien haben. Dann wird die mikroskopische Beschreibung derart "komplex", dass wir über die Beschreibung mit Hilfe von Verteilungsfunktionen nicht hinausgehen können. Zur Zeit kennen wir zwei Arten von dynamischen Systemen, bei denen dies der Fall ist: Systeme mit hinreichend starken Mischungseigenschaften und Systeme, welche die Poincaré-Katastrophe aufweisen (siehe Kapitel 11 und VII sowie Anhänge A und B). Hierzu gehören tatsächlich fast alle dynamischen Systeme mit Ausnahme einiger weniger "Schulbeispiele. Wir werden auf diese Frage in Abschnitt 4 zurückkommen.

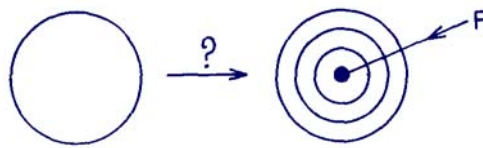


Abb. IX.2 Übergang zur mechanischen Beschreibung (Gebiet im Phasenraum zum Punkt P).

Man hätte befürchten können, dass derartige "natürliche Grenzen" der klassischen Theorie und der Quantentheorie deren Vorhersagekraft verringern würden. Nach unserer Auffassung ist das Gegenteil richtig. Wir können jetzt Aussagen über die Entwicklung von Verteilungsfunktionen machen, die über das hinausgehen, was über einzelne Trajektorien gesagt werden kann. Neue Begriffe tauchen auf.

Zu den interessantesten unter diesen neuen Begriffen gehören der mikroskopische Entropie-Operator \mathbf{M} und die Operatorzeit \mathbf{T} . Wir haben es hier mit einer zweiten Zeit zu tun, einer inneren Zeit, die ganz verschieden ist von der Zeit, welche in der klassischen oder der Quantenmechanik nur als Index von Trajektorien oder Wellenfunktionen vorkommt. Wir haben gesehen, dass diese Operatorzeit eine Unschärferelation mit dem Liouville-Operator \mathbf{L} erfüllt (siehe VIII.22 sowie Anhänge A und C). Wir können die Mittelwerte $\langle \mathbf{T} \rangle$ und $\langle \mathbf{T}^2 \rangle$ durch die Bilinearformen

$$\langle \mathbf{T} \rangle = \text{Sp}(\rho^+ \mathbf{T} \rho), \quad \langle \mathbf{T}^2 \rangle = \text{Sp}(\rho^+ \mathbf{T}^2 \rho) \quad (\text{IX-1})$$

definieren. Es ist bemerkenswert, dass die "gewöhnliche" Zeit – der Index in der Dynamik – dann gleich dem Mittelwert über die neue Operatorzeit wird. Das folgt tatsächlich aus der Unschärferelation (VIII.22), die zur Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle \mathbf{T} \rangle &= \frac{d}{dt} \left\{ \text{Sp}[\exp(-i\mathbf{L}t) \cdot \rho]^+ \mathbf{T} \exp(-i\mathbf{L}t) \cdot \rho \right\} \\ &= i \text{Sp} \left\{ \rho^+ \exp(i\mathbf{L}t) \cdot (\mathbf{L}\mathbf{T} - \mathbf{T}\mathbf{L}) \exp(-i\mathbf{L}t) \cdot \rho \right\} = \text{Sp} \left\{ \rho^+ \rho \right\} \\ &= \text{konstant} \end{aligned} \quad (\text{IX-2})$$

führt. Mit einer geeigneten Normierung können wir diese Konstante gleich Eins wählen. Wir sehen somit, dass die Gleichung

$$dt = d\langle \mathbf{T} \rangle \quad (\text{IX.3})$$

erfüllt ist. Mit anderen Worten: Die makroskopische Zeit ist einfach der Mittelwert über die neue Operatorzeit. Aus dieser Sicht lässt sich der gewöhnliche Zeitbegriff nur dann erhalten, wenn T zu einem trivialen Operator wird, derart, daß (in der klassischen Mechanik) die Gleichung gilt

$$T \rho(x, v, t) = t \rho(x, v, t) \quad (\text{IX.4})$$

In diesem Fall ist dann das "Alter" von der Form der Verteilung im Phasenraum unabhängig. Dagegen schließt der neue Zeitbegriff ein, dass das Alter von der Verteilung selbst abhängt; daher stellt er nicht mehr einen äußerlichen Parameter, ein Etikett wie in den herkömmlichen Formulierungen dar (siehe Anhang A).

Wir sehen, wie tief greifend die neue Betrachtungsweise unsere traditionelle Zeitauffassung verändert; die letztere erscheint nunmehr nur als eine Art von Mittelwert über "individuelle Zeiten" des Ensembles.

4. Niveaus der Beschreibung

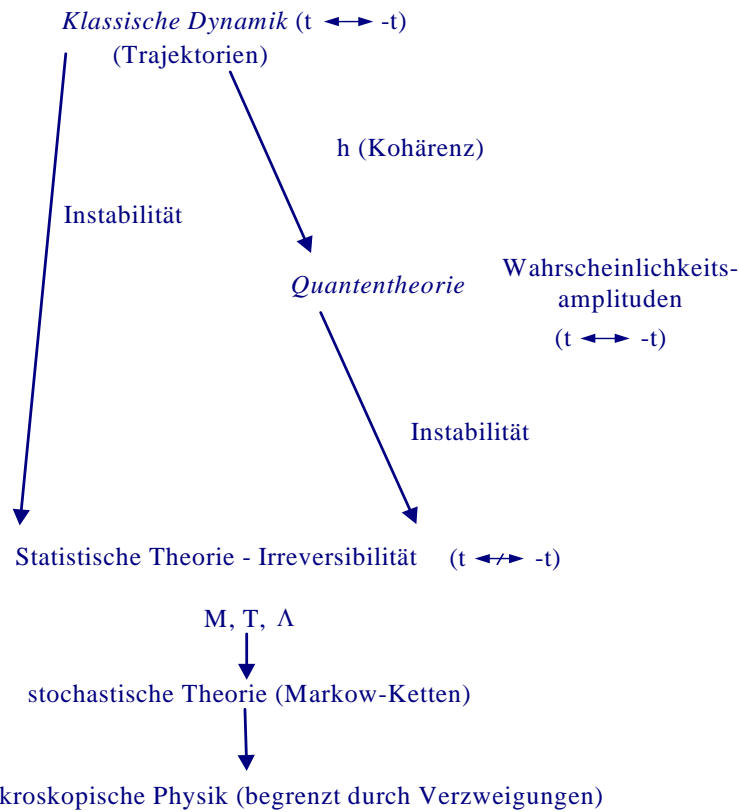
Wir sind in den Kapiteln I und II von der Physik des Seins ausgegangen der klassischen Mechanik und ihrer absoluten Vorhersagbarkeit, die lange Zeit als ein wesentliches Element des wissenschaftlichen Bildes von der physikalischen Welt galt. Es ist besonders bemerkenswert, dass sich das wissenschaftliche Bild in den drei Jahrhunderten moderner Wissenschaft – es erscheint in der Tat gerechtfertigt, das Jahr 1685, als Newton der Royal Society seine *Principia* vorlegte, als Geburtsdatum der modernen Wissenschaft zu betrachten – zu einer subtileren Konzeption hin entwickelt hat, in der sowohl deterministische als auch zufällige Merkmale eine wesentliche Rolle spielen.

Wir wollen hier nur die statistische Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik durch Boltzmann anführen, in der der Wahrscheinlichkeitsbegriff erstmals eine wesentliche theoretische Rolle spielte. Sodann haben wir die Quantenmechanik, die, wie von uns betont wurde, am Determinismus festhält, aber im Rahmen einer Theorie über Wellenfunktionen, die in einem wahrscheinlichkeitstheoretischen Zusammenhang gesehen werden müssen. Auf diese Weise tauchten erstmals Wahrscheinlichkeiten in der grundlegenden mikroskopischen Beschreibung auf.

Diese Entwicklung hält immer noch an. Wesentliche zufällige Elemente finden wir nicht nur in der Theorie der Verzweigungen auf der makroskopischen Ebene (siehe Kapitel V), sondern auch in der mikroskopischen Beschreibung, selbst in der von der klassischen Mechanik gelieferten (siehe Kapitel VII und VIII). Diese neuen Elemente führen schließlich, wie wir gesehen haben, zu einem neuen Begriff der Zeit und der Entropie, und die zu ziehenden Folgerungen werden uns noch eine Weile beschäftigen.

Es ist bemerkenswert, dass die klassische Dynamik, die statistische Mechanik und die Quantentheorie auf der Grundlage der von Einstein und Gibbs eingeführten Ensemble-Betrachtungsweise heraus erörtert werden können. Wenn der Übergang von einem Ensemble zu einer einzelnen Trajektorie nicht mehr durchgeführt werden kann, erhalten wir neue theoretische Strukturen. Wir haben die klassische Dynamik von diesem Standpunkt aus erörtert, insbesondere den Übergang zur statistischen Mechanik als das Ergebnis schwacher Stabilität. Wir haben auch erwähnt (siehe insbesondere die Anhänge C und D), dass die Existenz der Universalkonstante h Korrelationen im Phasenraum einführt und außerdem den Übergang von Ensembles zu einzelnen Trajektorien verhindert.

Wir können unsere Resultate in dem folgenden Schema darstellen:



Allmählich sind wir imstande, die verschiedenen Niveaus der Beschreibung, die wir wiederholt in dieser Monographie erörtert haben, zu koordinieren. Eine gewissen Vorsicht ist jedoch angebracht. Wir können beispielsweise für eine Klasse von stark instabilen Systemen, bei denen die Bäcker-Transformation eine Rolle spielt, die deterministische Beschreibung (in Form einer Liouville-Gleichung) in eine Beschreibung durch Markow-Kettentransformieren (siehe Anhang A). Dies gilt auch für allgemeinere Situationen, die eine schwächere Form der Instabilität (wie etwa die in Kapitel II erörterte Mischungseigenschaft) aufweisen. Ein anderes Beispiel ist die quantenmechanische Theorie (siehe Anhang C). Die quantenmechanische Instabilitätstheorie steht noch immer in ihren ersten Anfängen.

Wahrscheinlich werden in den nächsten Jahren weitere begriffliche Klärungen und neue Gesichtspunkte auftauchen. Dennoch ist unser augenblickliches Bild nicht inhaltslos, und es bringt einige grundlegende vereinheitlichende Anschauungen in die Struktur der theoretischen Physik.

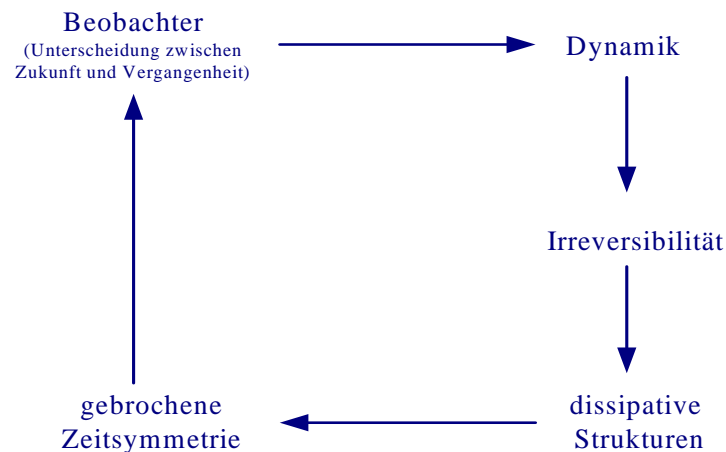
Wir wollen diesen Abschnitt mit einer Bemerkung über die dynamische Komplexität, die mit der Instabilität verbunden ist, schließen. In der klassischen Dynamik können wir uns zumindest einige einfache Situationen vorstellen, die zeitlich reversibel sind ($t \leftrightarrow -t$). Wenn jedoch chemische Prozesse (und noch mehr biologische Prozesse) betrachtet werden, wird das unmöglich, weil chemische Reaktionen – beinahe definitionsgemäß – immer mit irreversiblen Prozessen verbunden sind. Überdies schließen Messungen – die unsere Sinnesorgane erweitern – notwendig ein Element der Irreversibilität ein. Daher sind die beiden Formulierungen der Naturgesetze (die eine, für welche $t \leftrightarrow -t$ und die andere, für welche $t \nleftrightarrow -t$) gleichermaßen fundamental. Wir benötigen beide. Wir können natürlich die Welt der Trajektorien (oder der Wellenfunktion) als die fundamentale betrachten. Mit dieser Einstellung erhalten wir die irreversible Formulierung dann durch Einführung zusätzlicher Annahmen. Wir können aber andererseits auch die Irreversibilität als ein Grundelement unserer Beschreibung der physikalischen Welt auffassen und dann entspricht die Welt der Trajektorien und der Wellenfunktionen bedeutsamen Idealisierungen, die aber wesentliche Gesichtspunkte nicht beschreiben und sich nicht isoliert beobachten

lassen. Wir gelangen so zu einem gewissen selbstkonsistenten Bild, das wir gern ein wenig ausführlicher beschreiben möchten.

Abschnitt 5 : Vergangenheit und Zukunft

Sobald wir der Dynamik eine Ljapunow-Funktion hinzufügen können, lassen sich Zukunft und Vergangenheit genau wie in der makroskopischen Thermodynamik unterscheiden, in der die Zukunft mit größerer Entropie verbunden ist. Doch eine gewisse Vorsicht ist nötig. Wir können nämlich eine Ljapunow-Funktion konstruieren, die monoton mit dem "Strom" der Zeit zunimmt, oder eine andere, die abnimmt. Mathematisch ausgedrückt kann der Übergang von der einen Situation, die in Abb. IX. 1 (a) dargestellt ist und einer dynamischen *Gruppe* entspricht, zu der anderen, die in Abb. IX. 1(b) dargestellt ist und durch eine *Halbgruppe* beschrieben wird, auf zweierlei Weise durchgeführt werden: In der einen Beschreibung wird das Gleichgewicht in der "Zukunft" erreicht, in der anderen in der "Vergangenheit". Mit anderen Worten: Die Zeitsymmetrie der Dynamik kann auf zweierlei Weise gebrochen werden. Wie kann man dazwischen unterscheiden? Das ist eine schwierige Frage: Schon in seinen einfachsten Formen *setzt* das Leben eine Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft voraus. Einzellige Organismen wie Amöben wandern aus nährstoffarmen in nährstoffreiche Medien. Schon solche Organismen *akzeptieren* die Zukunft aufgrund von Signalen, die sie aus ihrer Umwelt empfangen.

Schon wenn wir die zeitlich reversiblen Gesetze der Dynamik studieren, machen wir einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft, wie etwa, wenn wir die Stellung des Mondes vorausberechnen oder wenn wir berechnen, wo er in der Vergangenheit stand. Die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft ist so etwas wie ein "*ursprünglicher Begriff*", der in einem gewissen Sinne der wissenschaftlichen Aktivität vorausgeht. Es ist jedoch möglich, diesen ursprünglichen Begriff in ein widerspruchsfreies Schema einzubeziehen. Der Sachverhalt lässt sich durch das folgende Diagramm darstellen:



Wir gehen von dem Beobachter aus, einem lebenden Organismus, der die Unterscheidung zwischen Zukunft und Vergangenheit macht, und gelangen am Ende zu dissipativen Strukturen, die, wie wir gesehen haben, eine "historische Dimension" enthalten. Nun können wir erkennen, dass wir selbst so etwas wie eine weiterentwickelte Form von dissipativen Strukturen sind, und damit die Unterscheidung zwischen Zukunft und Vergangenheit, die wir am Anfang einführten, "objektiv" rechtfertigen.

Auch in dieser Sicht gibt es kein Beschreibungsniveau, das wir als das fundamentale bezeichnen könnten. Die Beschreibung von kohärenten Strukturen ist nicht weniger "fundamental" als das Verhalten der einfachen dynamischen Systeme.

Man beachte, dass der Übergang von einer Ebene zur anderen mit einer "Symmetriebrechung" verbunden ist – die Existenz von irreversiblen Prozessen auf mikroskopischem Niveau, wie sie von den kinetischen Gleichungen beschrieben werden, verletzt die Symmetrie der kanonischen Gleichungen (siehe Kap. VIII), und dissipative Strukturen können ihrerseits die Symmetrie von Raum und Zeit brechen.

Schon die bloße Möglichkeit eines solchen widerspruchsfreien geschlossenen Kreises schließt die Existenz von Nichtgleichgewichtsprozessen ein; sie führt damit auf ein Bild einer physikalischen Welt, die aus irgendwelchen kosmologischen Gründen gerade die dazu notwendige Umwelt zur Verfügung stellt. Während die *Unterscheidung* zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen ein Problem der Dynamik ist und nichts mit kosmologischen Argumenten zu tun hat, lässt sich die bloße Möglichkeit des Lebens und damit die Aktivität des Beobachters nicht von der kosmologischen Umgebung trennen, in der wir uns nun einmal befinden. Allerdings wirft die Frage, was Irreversibilität im kosmischen Maßstab bedeutet und ob es möglich ist, im Rahmen einer dynamischen Beschreibung, in der Gravitation eine wesentliche Rolle spielt, einen Entropie-Operator einzuführen, derart gewaltige Probleme auf, dass ich hier lieber meine Unwissenheit eingestehe.

Abschnitt 6: Eine offene Welt

Den Vorstellungen der klassischen Physik lag die Überzeugung zugrunde, dass die Zukunft durch die Gegenwart determiniert sei und man daher durch ein sorgfältiges Studium der Gegenwart die Zukunft enthüllen könne. Das war natürlich nie mehr als eine theoretische Möglichkeit. Dennoch war diese unbegrenzte Vorhersagbarkeit in einem gewissen Sinne ein wesentliches Element des wissenschaftlichen Bildes von der physikalischen Welt. Man könnte sie vielleicht als den grundlegenden Mythos der klassischen Wissenschaft bezeichnen.

Heute wirkt die Situation zutiefst verändert. Es ist bemerkenswert, dass diese Veränderung im Grunde darauf beruht, dass wir die Beschränkungen der Messprozesse aufgrund der Notwendigkeit, die Rolle des Beobachters zu berücksichtigen, besser verstehen. Das ist ein immer wiederkehrendes Thema in den meisten grundlegenden Ideen, die während der Entwicklung der Physik im 20. Jahrhundert entstanden.

Dieses Thema kam schon in Einsteins Analyse von Raum und Zeit (1905) vor, in der die Begrenzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Signalen auf Geschwindigkeiten, die kleiner sind als die des Lichtes im Vakuum, eine so wesentliche Rolle spielt. Es steckt sicherlich kein logischer Widerspruch in der Annahme, dass Signale mit unendlicher Geschwindigkeit übertragen werden könnten, doch scheint dieser Raum-Zeit-Begriff, der auf Galilei zurückgeführt wird, einer Unmenge experimenteller Ergebnisse zu widersprechen, die bislang gewonnen wurden. Es bedeutete einen wesentlichen Fortschritt, dass die Begrenzung unserer Möglichkeiten, auf die Natur einzuwirken, mit einbezogen wurde.

Die Rolle des Beobachters in der Quantenmechanik wird in der wissenschaftlichen Literatur in den letzten fünfzig Jahren immer wieder behandelt. Diese Rolle ist grundlegend, was immer künftige Entwicklungen auch bringen mögen. Deshalb musste der naive Realismus der klassischen Physik, der davon ausging, dass unabhängig von dem Experimentiergerät die (zu messenden) Eigenschaften der Materie "da" seien, überholt werden.

Die in diesem Buch beschriebenen Entwicklungen weisen ebenfalls in diese Richtung, denn die Entstehung von Irreversibilität wird auf die Anwendung von Idealisierungen in der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik zurückgeführt, die über die Möglichkeiten jeder endlichen Messgenauigkeit hinausgehen.

Schon am Anfang der Thermodynamik finden wir "negative" Aussagen, die die Unmöglichkeit bestimmter Transformationen feststellen. In vielen Lehrbüchern wird der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik auf das Postulat gestützt, dass es unmöglich sei, Wärme unter Anwendung eines einzigen Wärmeverrates in Arbeit zu verwandeln. Diese negative Aussage gehört der makroskopischen Welt an – aber wir haben ihre Bedeutung gewissermaßen bis auf das mikroskopische Niveau weiterverfolgt, wo sie, wie wir gesehen haben, zu einer Aussage über die Beobachtbarkeit der grundlegenden begrifflichen Objekte der klassischen und der Quantenmechanik wird. Wie in der Relativität bedeutet auch hier eine negative Aussage nicht das Ende der Geschichte, denn sie führt wiederum zu neuen theoretischen Strukturen.

Sind uns wesentliche Elemente der klassischen Wissenschaft bei dieser jüngsten Entwicklung abhanden gekommen? Die zunehmende Einschränkung deterministischer Gesetze bedeutet, dass wir von einer geschlossenen Welt, in der alles gegeben war, zu einer neuen Welt gelangen, die offen ist für Schwankungen und Erneuerungen.

Für die meisten Begründer der klassischen Wissenschaft, selbst für Einstein, war die Wissenschaft ein Versuch, über die Welt der Erscheinungen hinauszugehen, um eine zeitlose Welt von höchster Rationalität zu erreichen – die Welt Spinozas. Vielleicht gibt es aber eine subtilere Form der Wirklichkeit, die sowohl Gesetze als auch Zufallsspiele, sowohl Zeit als auch Ewigkeit umfasst. Unser Jahrhundert ist ein Jahrhundert der Suche, neuer Formen der Kunst, der Musik, der Literatur und neuer Formen der Wissenschaft. Jetzt, fast am Ende dieses Jahrhunderts, können wir noch immer nicht vorhersagen, wohin dieses neue Kapitel der menschlichen Geschichte führen wird, doch eines ist zu diesem Zeitpunkt gewiss: Es hat einen neuen Dialog zwischen der Natur und dem Menschen eröffnet.