

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)

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.