

Umberto Curi

Zeitfeil – Zeitkonzepte im Zeichen der Irreversibilität

Bekanntlich lag in der klassischen Naturwissenschaft das Schwergewicht vornehmlich auf den von der Zeit unabhängigen Prinzipien: Waren die Ausgangsbedingungen einmal festgelegt, so konnten Gesetze formuliert werden, die in der Lage waren, die Zukunft vorauszusagen und die Vergangenheit zu bestimmen; vor allem im Bereich der Phänomene der Dynamik wurde die Zeit zu einem geometrischen Parameter reduziert, der erlaubte, die Aufeinanderfolge der verschiedenen Zustände zu verfolgen. Die Welt erschien somit als geordnetes Ganzes, das von ewigen und unveränderlichen Gesetzen regiert wurde und in dem die einzig möglichen Ereignisse diejenigen waren, die von jeher aus dem jeweiligen Zustand deduziert werden konnten. Wie Ilya Prigogine bemerkt hat¹, führte die Art der Naturbeschreibung zu einer Tautologie, insofern die Gegenwart gleichzeitig Vergangenheit und Zukunft mitenthielt: Mathematische Ordnung, Reversibilität der Phänomene, Determinismus, Einfachheit und Unveränderlichkeit waren die Charakteristika einer Naturwissenschaft, die, um das Verschiedene und Veränderliche auf das Identische und Permanente zurückzuführen, gezwungen war, die Zeit zu eliminieren.

Diese Auffassung des naturwissenschaftlichen Prozesses hat sich in den letzten einhundertfünfzig Jahren grundsätzlich geändert, beginnend mit den ersten Studien Fouriers über die Propagation der Wärme, die von der klassischen Dynamik nicht beschrieben werden konnte, weil sie sich in einem irreversiblen Prozeß vollzieht. Die folgende Entwicklung der Thermodynamik, die Entdeckung der Entropie als Größe, die nur im Zusammenhang mit irreversiblen Prozessen wachsen kann, die neuen Grenzen, die in der Erforschung des Mikrokosmos sowie in der Kosmologie erreicht wurden, haben das ›klassische‹ Weltbild der Physik drastisch verändert und eine radikale Revision einiger grundlegender Begriffe, vor allem des Zeitbegriffs, erforderlich gemacht. Man kann vielleicht sagen, daß die Erforschung des unendlich Kleinen und des unendlich Großen, die

Fortschritte der Mikrophysik und der Astrophysik, zu einem neuen Verständnis der Zeit geführt haben, mehr noch als zu einem neuen Bild des Raums. Wie Jacques Merleau-Ponty gezeigt hat, bedingt die Frage nach der Struktur des Universums eine Transformation des Problems der Kosmogonie, da fortan nicht mehr – wie in den antiken Kosmogonien – das Entstehen der Dinge im Raum, sondern das Entstehen des Raumes selbst und das Wesen der Zeit in Frage stehen, da ja der ›Inhalt‹ der Zeit von der Zeit als solcher nicht zu trennen ist.² Analogerweise führt die Einführung ›lokaler‹ Zeiten durch die spezielle Relativitätstheorie zu der Feststellung, daß die Zeit kein einfacher geometrischer Parameter der Bewegung ist, sondern interne Evolutionen in einer Welt im Ungleichgewicht mißt.³

Auf diese Weise ist die Zeit ins Innere zweier Bereiche eingedrungen, aus denen sie vordem zugunsten ewiger Gesetzmäßigkeiten ausgeschlossen war, nämlich in die Mikrophysik und in die allgemeine Kosmologie: Nicht nur das Leben, sondern die Gesamtheit des Universums hat eine Geschichte, die von irreversiblen evolutiven Prozessen skandiert wird und deren Veränderungen jede kontinuierliche und deterministische Vorstellung untergraben. Die Hauptcharakteristika der neuen Naturauffassung sind Instabilität, Nichtlinearität, Fluktuation und Indeterminismus. Den Kern dieser grundsätzlichen konzeptuellen Transformation der zeitgenössischen Naturwissenschaft bildet, verglichen mit der ›zeitlosen‹ Interpretation der klassischen Physik, der Begriff der Zeit; mit Prigogine läßt sich behaupten, daß »heute die Physik weder die Zeit noch deren Richtung verneint. Sie erkennt die irreversible Zeit der Evolutionen zum Gleichgewicht, die rhythmische Zeit der Strukturen, die sich gabelnde Zeit der instabilen Evolution und der Amplifikation der Fluktuationen, schließlich die Zeit, die die dynamische Instabilität im mikrophysikalischen Bereich zeigt. Jedes komplexe Wesen wird von einer Pluralität von Zeiten konstituiert, die untereinander auf subtile und multiple Weise verbunden sind.«⁴

Die Überwindung des klassischen Begriffs der Zeit als geometrischem Parameter, d. h. als quantitative Größe, vollzieht sich auch in anderen als den vorgenannten wissenschaftlichen Bereichen. Die Formulierung der mathematischen Theorie der kritischen Punkte – besser bekannt als Theorie der Katastrophe⁵ – beinhaltet einen Zeitbegriff, der in vieler Hinsicht dem der Thermodynamik der

irreversiblen Prozesse ähnelt. In der Theorie René Thoms impliziert die katastrophische Veränderung, verstanden als Übergang zwischen verschiedenen Zuständen relativer struktureller Stabilität, nicht nur die Singularität und die Irreversibilität der Veränderung, sondern auch einen variablen, diskontinuierlichen Zeitbegriff, der von Sprüngen und Brüchen gezeichnet ist, die nicht auf eine Abfolge homogener zeitlicher Phasen zurückführbar sind. Der Prozeß der Produktion der Formen, wie ihn René Thom⁵ und Christopher Zeeman⁶ nachdrücklich beschreiben, basiert auf einer Interpretation des Werdens, in der die Morphogenese strikt mit der Auflösung des linearen und quantitativen Zeitbegriffs zugunsten einer rhythmischen, deutlich skandierten und intrinsisch diskontinuierlichen Zeit verbunden ist.⁷ Mit aller Vorsicht, die beim Vergleich verschiedener Wissenschaftsbereiche und bei Verallgemeinerungen geboten ist, läßt sich sagen: Wie die Zeit mit der Thermodynamik in der Physik auftaucht und mit der Hypothese der Expansion die Geschichte Bestandteil der Kosmologie wird, so dringt mit der Theorie der Katastrophe die Zeit in die Mathematik und damit ins Innere jeder wissenschaftlichen Beschreibung irregulärer und diskontinuierlicher Phänomene ein. Ein Überblick über die Ereignisse seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts läßt den Schluß zu, daß die essentielle Bedeutung der Zeit in nahezu allen Wissensdomänen erkannt wird: in der Entwicklung der geologischen Formationen, der Arten, der Gesellschaften, der Moral, des Geschmacks und der Sprache.⁸

Doch mit der Entdeckung der Multiplizität der Zeit und ihrer Ununterdrückbarkeit in der wissenschaftlichen Beschreibung der Welt geht die Einsicht in ihre ›Richtung‹, in ihre implizite und unauslöschliche ›Hinfälligkeit‹ einher. Wenn das Universum nicht von der Unveränderlichkeit ewiger Gesetze regiert wird, sondern eine Geschichte besitzt, wenn Irreversibilität ein Konnotat zahlreicher wissenschaftlich untersuchbarer Ereignisse ist, dann kann die ›antike‹ Rede vom Alter der Welt, von ihrer Kindheit und ihrer Vergreisung, in neuem Lichte überdacht werden, und zwar nicht mehr nur als mythisches Stammeln eines von der entfalteten Klarheit der Rationalität noch weit entfernten Logos, sondern als profunde antizipierende Intuition. Der ›Zeitpfeil‹, von dem die Thermodynamik der irreversiblen Prozesse spricht, und die Anerkennung des qualitativen, pluralen und differenzierten Charakters der Zeit durch die heutige Wissen-

schaft erneuern, wenn auch in anderer Begrifflichkeit, die Bedeutung einer Reflexion über Geburt und Tod, nun nicht mehr nur isolierte biologische oder soziale Zyklen betreffend, sondern die Gesamtheit des Universums, seine Geschichte und sein Schicksal.

Das griechische Denken kennt zwei verschiedene Definitionen der Zeit: einerseits wird sie als *aion* beschrieben, das ›Immer-Seiende‹, die ›Dauer‹ ohne Grenzen, die weder Anfang noch Ende kennt und darum ewig im ›Jetzt‹ steht, frei von Vergangenheit und Zukunft; andererseits ist sie *chronos*, meßbare Größe, zeitliche Form des Werdens und Vergehens, die kontinuierlich Zukunft in Vergangenheit verwandelt.⁹ Beide Termini, die zwei deutlich unterschiedene, in gewisser Hinsicht widerstrebende Verständnisweisen der Zeit erfassen, erscheinen in den ersten Dokumenten der archaischen Spekulation und verweisen so auf die ursprüngliche Verflochtenheit des Zeitproblems mit der rationalen Befragung der Natur. Die grandiose kosmische Wechselfolge, mit deren Beschreibung Anaximander die abendländische Philosophie eröffnet, hat in der Tat in der Zeit-Chronos ihren theoretischen Schwerpunkt: Geburt und Tod des Seienden, die zyklische Erfüllung einer universalen Gerechtigkeit, die die von der Vielfältigkeit des Werdens zerstreute originäre Einheit wiederherstellt, erfolgt »gemäß der Ordnung der Zeit«. Wie der Stratege seine Kampffreien für eine Schlacht mit ungewissem und unvorhersehbarem Ausgang, so ordnet die Zeit-Chronos mit Hilfe der *taxis* den Gang der kosmischen Wechselfolge, den irreversiblen Prozeß des Werdens.¹⁰

Die Verknüpfung von ›Zeit‹ und ›Ordnung‹ findet sich auch, in grundverschiedenem Kontext und Begriff, in einem berühmten, jedoch meist mißverstandenen Fragment Heraklits. Hier ist die Zeit – Aion¹¹ – ein Kind, das sich als solches beträgt und spielend die Steine auf dem Spielbrett verteilt; die ›Ordnung‹, die seine Bewegungen lenkt, hat nichts mit der von der Zeit – Chronos – verfüigten regulären Sukzession der Ereignisse zu tun, sondern besitzt die jedem Spiel eigene indifferente Reversibilität zeitlicher Abfolgen. Darum, schließt Heraklit, ist die Zeit – Aion – »das Reich eines Kindes«.¹²

Diese Trennung zwischen ›äonischer‹ und ›chronischer‹ Zeit, zwischen der Dauer des ›Immer-Seienden‹ des Seins und der Irreversibilität des Werdens, wird in dem im platonischen *Timaios* beschriebenen

kosmologischen Mythos wiederaufgenommen, wo Aion die auf das Sein, das ewig und dauerhaft ist, bezogene Zeit meint, während Chronos dem Werden zukommt, wie dieses geschaffen und also zum Untergang bestimmt ist.¹³ Doch bei Platon ist Chronos nicht nur von Aion verschieden. Chronos stellt auch eine unvollständige ›Imitation‹ des Aion dar, insofern das von der chronischen Zeit geregelte Werden *mimesis* des Seins ist, das unbeweglich in der äonischen Dauer verharret.¹⁴ Folglich hat sich die Wissenschaft – als Erkenntnis dessen, was ist – nur mit Aion zu befassen: Wie Parmenides behauptet auch Platon, daß in wissenschaftlichen Termini nicht die Welt der Generation und Korruption, sondern einzig die ewige Welt der unwandelbaren Formen erkennbar ist.¹⁵

Die Bezugnahme auf das Zeitproblem findet sich im Zentrum der Bücher wieder, die Aristoteles der Physik widmet. Hier jedoch ist jeder Hinweis auf Zeit-Aion verschwunden, Zeit wird im Zusammenhang mit der Bewegung behandelt und gilt nur als Chronos.¹⁷ Platon hatte die zeitlosen Formen als Domäne der Wissenschaft dem chronischen und wissenschaftsunfähigen Reich des Werdens gegenübergestellt. Diese Aporie will Aristoteles durch eine ›äonische Erhebung‹ des Chronos lösen¹⁸, indem er nämlich der Zeit, die den Ablauf des Werdens mißt, dieselben Attribute zuspricht, mit denen Parmenides und Platon die Ewigkeit des Seins belegt hatten.¹⁹ Chronos ist für Aristoteles *a-rhythmos*, ›Zahl der Bewegung im Hinblick auf das Vorher und Nachher‹; das Werden wird Gegenstand der Wissenschaft, verliert aber den eigenen *rhythmos*, die irreversible Skansion der Ereignisse, die qualitativ unterschiedliche Prozessualität des Geschehens. Als Zahl der Bewegung wird die Zeit unausweichlich zum geometrischen Parameter, zum Maß einer Bewegung, die jedes tatsächlichen Dynamismus ledig ist, weil sie in die unbewegliche Gleichförmigkeit von räumlich benachbarten und grundsätzlich äquivalenten Ereignissen transformiert wird.²⁰ Die numerisch-quantitative Auffassung der Zeit erlaubt zwar die Formulierung ewiger wissenschaftlicher Gesetze, sie führt andererseits aber zur Verkennung der qualitativen Aspekte der Phänomene, der Irreversibilität der Naturprozesse, der Wirklichkeit des Werdens als unaufhörliche Dynamik von Generation und Korruption.²¹

Dieses Verständnis der Naturwissenschaft als Suche nach einer hinter der Veränderlichkeit der Phänomene verborgenen Wahrheit,

gegründet auf einer ›unrhythmischen‹ Sicht der Zeit, bleibt für lange Jahrhunderte dominant²², bis Thermodynamik und Mikrophysik, Kosmologie und Soziologie einen neuen Wissenschaftsbegriff einbringen, der den qualitativen und pluralen Charakter der Zeit anerkennt. Die in der zeitgenössischen Naturwissenschaft erfolgte Rehabilitierung der ›chronischen‹ Dimension der Zeit, ihrer taktisch-ordnenden Funktion, der irreduziblen Taxinomie, die sich den komplexen physikalischen und sozialen Phänomenen auferlegt, nimmt erneut das im Fragment des Anaximander beschriebene Szenario auf und trägt dem unaufhaltbaren Verfall und dem Tod der Systeme, und damit der Zeit als deren ordnendem Strategen, Rechnung. Die Rückkehr der Naturwissenschaft zu einer Auffassung der Zeit als irreversiblen und gerichtetem Prozeß, als Sukzession nicht-äquivalenter Phasen, die von einem Rhythmus gezeichnet ist, der nicht auf schlichte Skansion zurückgeführt werden kann, stellt in neuen Begriffen die antiken Fragen nach dem Schicksal des Menschen und des Kosmos.

Zweifellos ist die ›neue Allianz‹ zwischen Naturwissenschaft und Philosophie mit ihrer gemeinsamen Anerkenntnis eines ›chronischen‹ Zeitbegriffs in der Lage, die ›Schizophrenie‹ einer Wissenschaft zu überwinden, die – von Aristoteles bis Newton – die Zeit aus der wissenschaftlichen Beschreibung der Welt vertrieben hat; sie konsolidiert jedoch auf höchstem wissenschaftlichen Niveau das philosophische Wissen um das unausweichliche Altern der Individuen, der biologischen und sozialen Systeme, des Universums in seiner Gesamtheit. Wenn die Zeit, von der Heraklit als Aion spricht, tatsächlich als spielendes Kind dargestellt werden kann, so gleicht Chronos, zu dem das gegenwärtige philosophische und naturwissenschaftliche Denken sich bekennt, eher dem Bild eines sterbenden Greises.

Anmerkungen

- 1 I. Prigogine/I. Stengers, *La nuova alleanza*, Torino 1981.
- 2 J. Merleau-Ponty, *Cosmologies au XXème siècle*. Paris 1961. Vgl. dazu auch D. W. Sciama, *L'unità dell'universo*. Torino 1968; M. K. Munitz, *Spazio, tempo e creazione*, Torino 1959; P. Caldirola, *Dalla microfisica alla macrofisica*, Milano 1977; A. Cavaliere, *La struttura e la storia dell'universo* in: *Scienza e Cultura*, November 1979, S. 115–146; L. Gratton, *Relatività cosmologia e astrofisica*, Torino 1968. Einige dieser Thesen habe ich, vor allem in bezug auf

- das sog. ›Standard Big-Bang Modell‹, diskutiert in: Osservazioni sul rapporto scienza-ideologia, in: *Giornale di astronomia* 1981, S. 35–43.
- 3 Zu diesem Problem s. A. Grünbaum, *Philosophical Problems of Space and Time*, London 1964; E. Schrödinger, *L'immagine del mondo*, Torino 1963; B. I. Cohen, *La nascita della nuova fisica*, Milano 1972; G. Toraldo di Francia, *L'indagine del mondo fisico*, Torino 1976; R. Romano (Hg.), *Le frontiere del tempo*, Milano 1981. Zu Einsteins Kritik des ›klassischen‹ Begriffs der absoluten Zeit vgl. U. Curi, *Analisi operazionale e operazionalismo*, Padova 1970.
 - 4 I. Prigogine/I. Stengers, a. a. O., S. 54.
 - 5 Vgl. R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Paris 1972; ders., *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris 1974; ders.; *Parabole e catastrofi*, Milano 1980.
 - 6 Die Hauptbeiträge C. Zeemans zur Entwicklung der Thesen R. Thoms finden sich in: ders., *Catastrophe Theory: Selected Papers*, Cambridge (Mass.) 1977.
 - 7 Ich habe eine Applikation des ›katastrophischen‹ Modells auf die Interpretation der Entwicklung der Naturwissenschaften vorgeschlagen in: *Katastrophé. Sulle forme del mutamento scientifico*, Venezia 1982.
 - 8 Eine analoge Interpretation des Verhältnisses von Naturwissenschaft und Philosophie im 20. Jahrhundert findet sich in dem bedeutenden Buch von M. Cacciari, *Icone della legge*, Milano 1985.
 - 9 Die semantische Entwicklung des Begriffes *aion* von Homer bis ins Christentum ist ausführlich verfolgt worden von C. Lackeit, *Aion: Zeit und Ewigkeit in Sprache und Religion der Griechen*, Königsberg 1911, während die Analyse von R. L. Löwe, *Kosmos und Aion*, Gütersloh 1935, sich auf die späthellenistische Periode beschränkt. Weitere wichtige Beiträge finden sich in: J. F. Callahan, *Four views of time in the Ancient Philosophy*, Cambridge 1948; C. Diano, *Il concetto della storia nella filosofia dei Greci*, in: *Grande Antologia Filosofica* Marzorati, II, Milano 1954; A. Levi, *Il concetto del tempo nei suoi rapporti coi problemi del divenire e dell'essere nella filosofia greca fino a Platone*, Milano 1919.
 - 10 Hermann Diels: *Die Fragmente der Vorsokratiker*. Griech. u. dt., hg. v. Walther Kranz, 1. Bd., Berlin 1956 (8. Aufl.), zum Fragment B 1 des Anaximander. Vgl. in diesem Band: Heinemann, *Die Anordnung der Zeit*.
 - 11 Heraklit, *Fragm. B 52* in H. Diels/W. Kranz, a. a. O.: »Die Lebenszeit ist ein Knabe, der spielt, hin und her die Brettsteine setzt: Knabenregiment!« (S. 162). Die Interpretationen dieses viel diskutierten Fragments sind häufig widersprüchlich: Während z. B. C. Mazzantini (Eraclito, Torino 1945, S. 227) *aion* als »la vita che perpetuamente si rinnova nel tempo« versteht, sieht G. S. Kirk (Heraclitus. *The Cosmic Fragments*, Cambridge 1954, S. XII) eher den Bezug zum »Human lifetime« und zum Schicksal, das den einzelnen Individuen bestimmt ist. Zur Quellenkritik vgl. R. Walzer, *Eraclito*, Firenze 1939, S. 89. Ein kommentierender Überblick der jüngeren Interpretationen findet sich bei: C. Diano/G. Serra, *Eraclito*, Padova 1975, und bei: C. Kahn, *The Art and Thought of Heraclitus*, Cambridge 1979. In meiner Arbeit: *Dagli Ionici alla crisi della fisica*. Padova 1974, habe ich Heraklit ein Kapitel gewidmet.

- 12 Für eine ausführliche Analyse der Bedeutung von *aion* in diesem Fragment bleibt grundlegend die Arbeit von R. Degani, *Aion. Da Omero ad Aristotele*, Padova 1961, S. 72–76. Nach Heraklit – und vor Platon – erscheint der Begriff Aion bei Empedokles (Fragm. B 16), wo er in der Form *aspetos aion*, der »unendlichen Zeit«, *Neikos* und *Philia* umfaßt, seit und für immer.
- 13 Platon, *Timaios* 37 d–38 a: »Die Natur dieses Lebens nun war aber eine ewige und diese Eigenschaft dem Erzeugten vollkommen zu verleihen, war selbstverständlich unmöglich. So sann er darauf, ein bewegliches Abbild der Ewigkeit zu gestalten, und macht, indem er dabei zugleich den Himmel ordnet, von der in dem Einen verharrenden Ewigkeit ein in Zahlen fortschreitendes ewiges Abbild, und zwar dasjenige, dem wir den Namen Zeit beigelegt haben. Tage und Nächte, Monate und Jahre nämlich, die es, ehe der Himmel entstand, nicht gab, läßt er dann zugleich mit der Erschaffung eines jenes mitentstehen; diese aber sind insgesamt Teile der Zeit, und das »war« und das »wird sein« sind gewordene Formen der Zeit, die wir, uns selbst unbewußt, unrichtig auf das ewige Sein übertragen. Denn wir sagen doch: es war, ist und wird sein; der richtigen Ausdrucksweise zufolge kommt aber jenem nur das »ist« zu, das »war« und das »wird sein« ziemt sich dagegen nur von dem in der Zeit fortschreitenden Werden zu sagen, sind es doch Bewegungen. Dem stets sich selbst gleich und unbeweglich Verhaltenden aber kommt es nicht zu, in der Zeit jünger oder älter zu werden . . .« Platon-Werke in 8 Bänden. Griech. u. deutsch. Bearb. v. Klaus Widdra, deutsche Übersetzung v. Hieronymus Müller u. Friedrich Schleiermacher. 7. Band: *Timaios-Kritias-Philebos*, Darmstadt 1972.
- 14 Der Zeit-Aion kommt nichts von dem zu, »was das Werden den im Bereich der sinnlichen Wahrnehmung sich bewegendem Dingen anheftete; vielmehr sind diese entstanden als Formen der die Ewigkeit nachbildenden und nach Zahlenverhältnissen umlaufenden Zeit«. Plat. *Timaios* 38 a–b. Übers. aus: Platon, Werke in 8 Bänden, a. a. O., 7. Bd. Wie E. Degani (*Aion*, a. a. O., S. 80) richtig bemerkt, »unterscheidet Platon deutlich zwei Formen der Zeit: die punktuelle Außerzeitlichkeit von Aion und die vielfältige Zeitlichkeit von Chronos. Auf der einen Seite steht das Verharren in der Einheit . . . auf der anderen Seite das numerische Fortschreiten und die Vervielfältigung in aufeinanderfolgende Teile. Für Aion, genannt in die aoristische Temporalität des »ist«, ist jeder Begriff von zeitlicher Extension unangebracht . . . Chronos hingegen, die Zeit des »dieses« und des täglichen Werdens, kennt die Stabilität des »ist« nicht«.
- 15 Ich habe versucht, diese Interpretationshypothese zu demonstrieren in meinem Buch: *La linea divisa. Modelli di razionalità e pratiche scientifiche nel pensiero occidentale*, Bari 1983.
- 16 E. Degani (*Aion*, a. a. O., S. 83) unterstreicht, daß »für die nachplatonische Philosophie Aion denselben Wert hat wie »Ewigkeit«; und Platons Bild von der Zeit als »beweglichem Abbild der Ewigkeit« verursachte im Neoplatonismus eine reichhaltige Serie von mythischen Bildern«.

- 17 Vgl. die berühmte Definition der Zeit-Chronos als ›Zahl (anythmos) der Bewegung im Hinblick auf das Vorher und Nachher‹ (Aristoteles, Physik 219 b 1; die Verbindung zwischen Zeit und Bewegung erscheint ebenso in Aristoteles, De gen., 337 a, 23).
- 18 Mir scheint diese Interpretation durch die Bemerkungen von E. Degani (Aion, a. a. O., S. 87) gestützt zu werden: »Man kann sagen, daß sich mit Aristoteles die glänzende Formulierung Platons über die Ewigkeit verdüstert und daß, rein philosophisch gesehen, eine präzise Unterscheidung zwischen Chronos und Aion fehlt.« Nicht zufällig belegt Aristoteles wiederholt Chronos mit Attributen – *afthartos*, *agenetos* –, die eigentlich Aion zukommen, cfr.: Aristoteles Phys., 222 a, 27 ss., 215 b, 10 ss., 263 a, 15 ss.; Meteor., 353 a, 15 ss.; De Lin. ins., 969 a, 29; vgl. dazu N. Abbagnano, La nozione del tempo secondo Aristotele. Lanciano 1933; A. Levi, Il concetto del tempo in Aristotele. In: Athenaeum 25, 1948.
- 19 Aristoteles, De caelo, 279 a, S. 22–25: »Darum ist auch dieser Name des Aion auf göttliche Weise von den Alten ausgesprochen worden. Denn die Fülle, welche die Zeit des Lebens für jedes einzelne umfaßt, außerhalb deren naturgemäß nichts weiter ist, wird der Aion jedes einzelnen genannt. In demselben Sinne ist nun auch die Fülle des ganzen Himmels, die die ganze Zeit und die Unbegrenztheit umfaßt, der Aion, und hat den Namen vom ›stets sein‹ (*aei on*) als ein Unsterbliches und Göttliches.« (Aristoteles. Vom Himmel. Von der Seele. Von der Dichtkunst. Eingel. und neu übertragen von Olof Gigon, Zürich 1950.) Man kann also behaupten, »daß Aristoteles in diesem Argument den Begriff Aion als Dauer in doppelter Bedeutung gebraucht: erstens als Dauer des natürlichen, begrenzten Lebens des einzelnen Seienden; zweitens aber bedeutet Aion auch die ewige Dauer, Ewigkeit, da der Name sich von ›immer sein‹ herleitet« (P. Phillippon, Il concetto greco di tempo nelle parole Aion, Chronos, Kairos, Eniautos, in: Rivista di storia della filosofia 4, 1949, S. 81–97, hier S. 89).
- 20 »Bei Aristoteles, offensichtlicher noch als bei Platon, ist und bleibt Chronos die Zeit der Mathematik und der Physik, vollständig säkularisiert und mathematisiert.« (E. Degani, Aion, a. a. O., S. 87.)
- 21 Eine ausführlichere Entwicklung dieser Überlegung findet sich in meiner *La linea divisa*, a. a. O., S. 82–96.
- 22 Nach Aristoteles »bleibt Aion die nicht meßbare Zeit, während Chronos die bewegliche und meßbare Zeit ist: im ersten Begriff sah der Gemeinmann die Bedeutung von *aei*, während er den zweiten mit *choreia* verband« (E. Degani, Aion, a. a. O., S. 88).

Man halte sich das Bild eines alten Menschen vor Augen: Faltig und doch abgeklärt, müde und doch lebendig, wissend und doch schweigsam, leidend und doch freudig, resigniert und doch nach vorne gewandt. Wohin gewandt? Doch wohl dem Tode zu.



Die Zeichnung (Abb. 1) zeigt eine Frau im Alter von 88 Jahren, meine Tante. Inzwischen ist sie 94, sie hat sich kaum verändert. Eine Frau mit einem gemeißelten Gesicht, bis zum Grotesken charakteristisch geworden, der Körper verfallend, faltig, die Hände rheumatisch verknöchert, körperlich objektiv ein Wrack. Aber sie begreift, diskutiert, kritisiert, läßt nicht locker, bringt auch junge Menschen zu fundierten Stellungnahmen und Bekenntnissen. Ihre geistige Intensität überwindet den verfallenden Körper. Das Primat des Geistes über

die Materie. Es ist schön, so zu altern, aber nicht die Regel. Im Verfall kann große Schönheit liegen:

»Ich glaube keinen Tod: Sterb ich gleich alle Stunden,
so hab ich jedesmahl ein besser Leben funden.« (Angelus Silesius)

Wenn man begreifen will, was Altern, was Sterben ist, muß man zunächst fragen: Was ist Leben, was ist Geborenwerden?

1. Leben, ein unwahrscheinlicher Zustand

Leben ist entstanden. Wenn man die einfachen physikalischen Gesetze auf diesen Prozeß anwendet, ist die Existenz von Leben etwas vollkommen Unwahrscheinliches, ja Unmögliches. Man kann ausrechnen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß sich die auf der Erde vorhandenen Moleküle so anordnen, daß ein komplexes Lebewesen wie der Mensch mit seinem Großhirn entsteht. Diese Wahrscheinlichkeit ist unendlich klein oder andersherum ausgedrückt: Physikalisch gesehen erscheint die Existenz der Menschen unmöglich. Wir existieren aber. Es gibt heute Erklärungsversuche, wie das Leben auf der Erde entstanden sein könnte (vgl. dazu Bernd-Olaf Küppers in diesem Band). In der Evolution ist der Mensch in einem Stammbaum entstanden. Leben ist nichts Statisches, sondern etwas höchst Dynamisches, ein Zustand, der unwahrscheinlich ist und weit vom Gleichgewicht entfernt. Leben ist ein Zustand vergleichbar dem einer Kugel auf einer Nadelspitze, die ständig herunterzufallen droht und nur durch künstliche Hilfe von außen gehalten werden kann. Dieser Zustand kann nur aufrechterhalten werden durch ständige Zufuhr von Energie, die die Kugel auf der Spitze hält bzw. sie immer wieder hochschiebt. Solche Zustände von Nicht-Gleichgewicht sind heute für die physikalischen und chemischen Wissenschaften von besonderem Interesse. Man stellt nämlich fest, daß man mit den bisherigen Denkprinzipien bei der Behandlung dieser komplizierten Prozesse nicht mehr auskommt.

Leben ist entstanden, d. h. es war nicht von vorneherein da. Wie ist es entstanden? Jeder kennt Darwins Vorstellungen und die Stammbäume, die zu den einzelnen Arten führen. Alle komplexen Prozesse zeigen solche Stammbäume. Ja, es stellt sich als ein allgemeines Prinzip komplexer, evolvierender Prozesse heraus, daß diese in Form von Stammbäumen verlaufen. Was bedeutet das? Unsere Denkbahnen sind einer jahrzehntelangen newtonischen Pädagogik unterwor-

fen, sie sind wie Wurfparabeln: Anfangsgeschwindigkeit und Wurf-richtung entscheiden eindeutig und ein für allemal, wie weit und wohin der geworfene Stein fliegt. Beschleunigung und Bremsweg unseres Autos sind kalkulierbare Größen, mit welchen zu rechnen wir uns im täglichen Umgang überhaupt angewöhnt haben. Wir unterstellen, daß wir mit stetigen Ereignissen zu tun haben, die sich zu jeder Zeit und an jedem Ort reproduzieren lassen. Aber genauso sind Ereignisse in hochkomplexen Systemen nicht zu erfassen: weder im Lebendigen, noch in der Hochenergie-Physik, noch beim Auftreten von Turbulenzen oder in der Physik der Elementarteilchen. Aber Leben ist uns zu nah und selbstverständlich, und die physikalischen Systeme sind weit von der direkten Anschauung entfernt, sie betreffen unsere kantischen Anschauungsformen kaum. Nicht nur das Ohr ist in der newtonisch-kantischen Erfahrungslehre vernachlässigt (wie Ulrich Sonnemann gezeigt hat), auch das Auge, der große Vereinfacher, das engmaschige Sieb für die Realität der großen Welt außerhalb der Augenhöhle. Man wird also den Begriff der Kausalität neu überdenken müssen.

Systeme mit Stammbäumen haben bekanntlich Verzweigungspunkte. An jeder Verzweigung gibt es Alternativwege, die gleichberechtigt sind. Welcher dieser Wege beschritten wird, läßt sich nicht voraussagen. Streng deterministische Ausgangsbedingungen ermöglichen selbst bei Kenntnis sämtlicher Parameter wegen der Verzweigungspunkte in den Stammbäumen keine Voraussage, und werden dadurch indeterministisch. Diese Verzweigungspunkte nennen die Mathematiker Fulgurationspunkte, der Weg des Blitzes liefert dafür das Modell. Energiefluß und Stofftransport sind hier aufs engste miteinander gekoppelt. Die Verästelungen eines Blitzes sind wegen der damit verbundenen Turbulenzen grundsätzlich nicht vorhersagbar, der Blitz ist nicht wiederholbar; es hat in der ganzen meteorologischen Geschichte der Erde noch keine zwei gleichen Blitze gegeben, sie werden geboren und sterben. Diese indeterministische Struktur läßt sich auch an Stammbäumen aus anderen Bereichen beobachten: etwa an einem Flußdelta, auch hier liegt eine Koppelung von Stofftransport, nämlich Schlamm, und hydrodynamischer Energie vor. Oder an den Verästelungen einer Baumkrone, am Evolutionsstammbaum des Menschen. Auch die Ontogenese eines höheren Lebewesens aus der Eizelle, also die Differenzierung des Organismus von der

befruchteten Eizelle bis zum erwachsenen und schließlich alternden und sterbenden Menschen läßt sich schematisch wie ein Stammbaum darstellen.

Alle diese Systeme, so verschieden sie stofflich sind, gleichen sich prinzipiell: Sie entstehen in nicht reproduzierbaren Vorgängen, entfalten sich, altern und sterben.

Warum müssen sie altern und sterben? In linearen Systemen ist jeder Vorgang wiederholbar, reversibel, insofern ist dort auch die Zeit reversibel. Sie hat eine unpolare Struktur. Newtonsche Systeme altern nicht. In Stammbaumsystemen mit Fulgurationspunkten kann man nicht ohne weiteres die Entwicklungslinien rückwärts befolgen. An jedem Fulgurationspunkt ist eine irreversible Entscheidung gefallen: Die Zeitrichtung ist irreversibel, und Zeit hat damit eine ganz neue Bedeutung erhalten. Genauer, sie hat ihre alte Bedeutung wiedergewonnen: Zeit ist aufzufassen als eine des Alterns, als alternde Zeit. Prigogine schreibt darüber: »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.«

2. Biochemische Mechanismen

In Stammbaumsystemen sind Energieeinflüsse mit physikalischen und chemischen Ereignissen verknüpft, so daß immer Neues entstehen kann. Wenn der Energiefluß aufhört, stellt sich sofort das thermodynamische Gleichgewicht ein. Wenn es mir zum Beispiel gelänge, das physikalische Gleichgewicht der Stoffe meines Körpers in Sekundenbruchteile zu erreichen, würde ich mich in ein Rauchwölkchen, in Wasserdampf und ein Häufchen Asche auflösen.

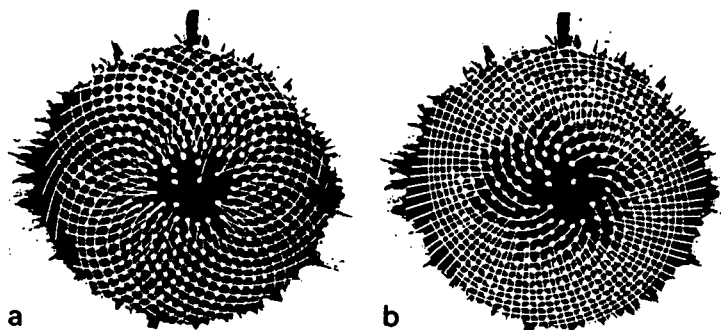
Welche Mechanismen ermöglichen es uns, diesen unwahrscheinlichsten aller Zustände, das Leben, sogar das Leben mit einem funktionierenden Gehirn, mit Willen zum Leben und zum Besiegen der körperlichen Gebrechen aufrechtzuerhalten? Ich kann diese Fragen an dieser Stelle nicht ausführlich erörtern; einen grundsätzli-

chen Mechanismus, den der Eiweißsynthese, haben wir am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in den letzten Jahren untersucht und erklären können.

Unser Körper besteht aus Eiweißstoffen, den Proteinen, die kompliziert aufgebaute und zusammengesetzte Kettenmoleküle sind. Beim Aufbau dieser Stoffe können Fehler gemacht werden. Jeder Fehler verringert die Überlebenschance. Aber zunächst kann man mit dem Fehler noch weiterleben, bis schließlich eine sogenannte Rückkopplungskatastrophe auftritt. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit einem Verkehrsfluß. Bei dichtem Verkehr kann bei vernünftigem Verhalten aller Fahrer der Verkehr geregelt weiterfließen. Es kann sich unter Umständen auch ein kleinerer Unfall ereignen, der den Verkehr an einer bestimmten Stelle verlangsamt, ein parkendes Fahrzeug kann zu gewagten Ausweichmanövern zwingen. Der Verkehr wird dichter und gefährlicher. Durch einen Unfall erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für einen weiteren. Zwei, drei, vier, fünf Unfälle kann das Verkehrssystem einer Stadt noch verkraften, der sechste, vielleicht unbedeutende Auffahrunfall bringt aber plötzlich das gesamte System zum Erliegen, so daß in sämtlichen Hauptstraßen der Verkehr für Stunden stillsteht. Diesem Zustand ist der Tod vergleichbar. Leben ist ein dynamisches System, welches durch verschiedene »Reparaturmechanismen« immer wieder in den Lebensfluß, d. h. in den geordneten Zustand zurückfinden kann, schließlich aber doch an einem unvorhersagbaren Fulgurationspunkt zusammenbricht. Der Aufbau der Proteine wird, wie wir gefunden haben, durch einen Reparaturmechanismus kontrolliert, den wir »Korrekturlesen« nennen; der Vorgang ist in der Tat mit dem Korrigieren eines komplizierten Schriftsatzes zu vergleichen.

3. Lebende Ordnung und pythagoräische Zahlenmystik

Leben stellt Ordnung her. Ich nenne als einfaches Beispiel das hochgeordnete Muster eines Sonnenblumenkorbes oder eines Tannenzapfens. Botaniker haben herausgefunden, daß die Schnittstellen der Kurven bei den Tannenzapfen, ähnlich bei Ananas und bei den Sonnenblumen, einem bestimmten Zahlenverhältnis gehorchen, der sogenannten Fibonacci-Reihe, die der italienische Mathematiker Leonardo da Pisa, genannt Fibonacci, im Jahre 1208 in ganz anderem Zusammenhang aufgestellt hat. In der Fibonacci-Reihe ist das jeweils



Fruchtkörbe von Sonnenblumen, die auffälligsten Bogenlinien sind markiert.

folgende Glied immer die Summe der zwei vorhergehenden Glieder. Die Fibonacci-Reihe ist aber gleichzeitig die mathematische Formulierung des »Goldenen Schnittes«.

Gerät man hier unversehens in pythagoräische Zahlenmystik, verläßt man den Boden der physikalisch begründeten Tatsachen? P. Richter konnte kürzlich zeigen, daß diese Figuren und Zahlenverhältnisse notwendig entstehen, wenn man das Prinzip des Wachstums bei gleichzeitiger Abstoßung, also ein rückgekoppeltes dynamisches Prinzip anwendet. Zahlentheoretisch ist dieser Ausdruck ein Kettenbruch, das Irrationalste aller Zahlenverhältnisse; es stellt sozusagen den Übergang von Ordnung zu Chaos dar. Und genau dieser wird von uns als die schönste Schönheit und Harmonie empfunden: Schönheit ist die Synthese von Ordnung und Verfall. Schönheit ist Alter. Alter ist Schönheit.

4. Von der Notwendigkeit des Alterns und Sterbens

Wir leben – und das begreifen wir erst jetzt, nachdem Darwins Evolutionslehre in ihrer Tragweite voll erfaßt worden ist – nicht in einer Welt des Seins, sondern in einer Welt des Werdens. In einer solchen Welt ist die Zeit irreversibel. Die Zeitachse läuft in einer Richtung, eine Umkehr ist nicht möglich. Das bedingt eine völlig neue Art des Denkens, verlangt eine Abkehr von der uns prägenden Newtonschen Denkweise. Ihr gelten physische Vorgänge als reversibel, die Planeten bewegen sich in Bahnen; das Pendel schwingt hin

und zurück, alle Experimente sind wiederholbar, Differentialgleichungen sind linear oder linearisierbar: In irreversiblen Prozessen ist all das nicht der Fall. In der Newtonschen Auffassung wäre das Leben ein Uhrwerk, das allmählich abläuft. Könnte man aber den Mechanismus des Wiederaufziehens finden, dann würde der Ablauf des Lebens wiederholbar, so daß im Prinzip ewiges Leben möglich wäre. Heute wissen wir, daß irreversible dynamische Systeme grundsätzlich sterben müssen. Leben ist die schmale Gratwanderung zwischen Ordnung und Chaos, die schließlich zum Tode führt. Und auch Schönheit ist eine schmale Gratwanderung zwischen Ordnung und Chaos. Nur dadurch, daß das Leben zum Tode führt, ist es schön.

5. Thesen über Altern und Tod

Leben ist ein verzweigtes Netzwerksystem mit unzähligen Rückkopplungen, ein Netzwerksystem, welches notwendig altert. Tod ist ein katastrophales Ereignis in einem solchen Netzwerksystem, in dem die Energie- und Materialflüsse schließlich nicht länger aufrechterhalten werden können. Solche Systeme können nicht mit den einfachen Ausdrücken der klassischen Physik beschrieben werden. Man benötigt dazu die Prinzipien der irreversiblen Thermodynamik, in welcher die Zeit ebenfalls irreversibel und vektoriell ist. Damit wird der Kantsche Begriff der Zeit als apriorischer Anschauungsform außer Kraft gesetzt oder bedarf zumindest der Modifizierung. Freilich gibt es Wahrscheinlichkeiten, aber man kann prinzipiell nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt oder unter welchen Bedingungen das Membranpotential einer Nervenzelle zusammenbrechen wird oder zu welcher Zeit ein Herz aufhören wird zu schlagen.

Tod ist die letzte Konsequenz der Begrenzung unserer Chemie. Diese ist in komplexeren Strukturen nicht frei von Fehlern. Die Begrenzungen der Chemie des Lebens können durch Hineinpumpen von Energie im Prinzip korrigiert werden und somit könnten Altern und Sterben aufgeschoben werden durch einen hohen Energieaufwand. Unsterblichkeit könnte man durch einen unendlichen Einsatz von Energie erreichen. Das ist jedoch nicht im Interesse des Lebens. Denn für das Leben als Ganzes ist das Überleben der Art notwendig und nicht das des Individuums. Der Genotyp muß erhalten werden, nicht der Phänotyp. Deshalb muß für die erforderliche Kontinuität des

Genotyps der Phänotyp früher oder später geopfert werden, und es hängt von den Lebensbedingungen der jeweiligen Art ab, welches die günstigste Lebenszeit für das Individuum ist.

Schlußbemerkung

Ich glaube, es gibt wirklich einen Fortschritt in den Wissenschaften. Damit meine ich nicht etwa das Auffinden von neuen Elementarpartikeln oder neuen chemischen Verbindungen, von neuen Medikamenten oder neuen technischen Entdeckungen, und seien es Fahrten zum Mond. Unter Fortschritt in den Wissenschaften verstehe ich die Entdeckung von fruchtbaren neuen, vereinheitlichenden Konzepten. Und solch ein vereinheitlichendes Konzept scheint mir die Erkenntnis der Irreversibilität der Zeit, der sterbenden Zeit zu sein. Ob wir sagen: Altern und Tod sind unvorhersagbar, da sie über Fulgurationspunkte verlaufen; oder (mit den Worten der Bibel): »Mitten im Leben sind wir vom Tod umfassen« – wir drücken damit dieselbe menschliche Grunderkenntnis aus, einmal in der kühlen präzisen quantitativen Sprache der Wissenschaften und das andere Mal in der farbigeren Sprache eines leidenden menschlichen Wesens. Ob wir sagen: Tod ist die notwendige Folge des Weiterbestehens von Leben als Ganzem in einer evolvierenden Welt; oder:

. . . und solange du das nicht hast
dieses stirb und werde,
bist du nur ein trüber Gast
auf der dunklen Erde . . .

wir drücken mit beiden Aussagen dieselbe grundsätzliche menschliche Erfahrung aus, daß Leben und Tod ein Paar sind. Ich schließe mit einem Zitat von Søren Kierkegaard, der schon vor 150 Jahren das Leben als eine irreversible, dissipative Struktur erkannt hat: »Leben können wir nur im Blick nach rückwärts verstehen, aber wir müssen es nach vorwärts leben.«

Literatur

- Angelus Silesius, Cherubinischer Wandersmann, Stuttgart 1984.
Friedrich Cramer, Fundamental Complexity – a Concept in Biological Science and Beyond, Interdisciplinary Science Reviews 4 (1979) S. 132–139.

- Friedrich Cramer, Death – From Microscopic to Macroscopic Disorder, in: E. Frehland (Hg.) Synergetics – From Microscopic to Macroscopic Order, S. 220–228, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1984.
- I. Prigogine: Vom Sein zum Werden, München 1979.
- I. Prigogine: Dialog mit der Natur, München 1982.
- F. v. d. Haar/H. J. Gabius/F. Cramer: Aminoacyl-tRNA Synthetasen als Zielenzyme für eine rationale Arzneimittelentwicklung, in: Angew. Chemie 93 (1981) S. 250–256.
- P. H. Richter/R. Schraner: Leaf Arrangement – Geometry, Morphogenesis and Classification, in: Naturwissenschaften 65 (1978) S. 319–327.

Das Generalthema dieses Bandes muß dem Physiker in mancherlei Hinsicht widersprüchlich erscheinen. Sind nicht Raum und Zeit *die* unwandelbaren Grundgrößen der Physik? Wie kann aber etwas unwandelbar und zugleich sterblich sein? Und ist nicht der Prozeß des Sterbens selbst nur als ein Vorgang denkbar, der *in* der Zeit ist, also gerade das Vorhandensein dessen voraussetzt, was hier als »sterbend« thematisiert wird?

Jeder Prozeß und damit auch jede Form menschlicher Erfahrung ist unauflösbar an die Existenz der Zeit geknüpft. Wenn wir in dieser Weise von dem Phänomen »Zeit« sprechen, dann meinen wir die gleichmäßig verlaufende, physikalisch meßbare Zeit, der jedes materielle Objekt unentrinnbar ausgesetzt ist. Allerdings gibt es noch einen komplexen und diffizilen Aspekt des Zeitphänomens, der jenseits der objektiven physikalischen Zeit liegt: Es ist die Zeit, wie sie sich als Produkt unseres *subjektiven* Zeitempfindens manifestiert. Die subjektive Zeit ist keine metrisierbare Größe, die gleichmäßig verstreicht, sondern ein Phänomen, das unserem Bewußtsein entspringt und das selbst wieder eine vielschichtige Struktur besitzt.

Für den Naturwissenschaftler drängt sich hier natürlich die Frage auf, ob und inwieweit sich die Formen unseres subjektiven Zeitempfindens objektivieren und zur physikalischen Zeit in Relation setzen lassen. Von zentraler Bedeutung für diesen Problemkreis ist zweifelsohne das Phänomen der »Zeitstruktur«, denn nur durch die Strukturierung der Zeit in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft wird die Zeit überhaupt zu einem wahrnehmbaren Phänomen. So sollen denn auch im Vordergrund der folgenden Betrachtung die Zeitstruktur der Wirklichkeit sowie die Möglichkeiten und Grenzen ihrer naturwissenschaftlichen Deutung stehen.

Irreversibilität des Naturgeschehens und Zeitstruktur

Es wird sich als zweckmäßig erweisen, wenn wir zunächst »Raum« und »Zeit« in ihren physikalischen Eigenschaften gegeneinander abgrenzen. Ein Unterschied zwischen Raum und Zeit besteht z. B. in den

Dimensionen. Man kann im Raum in drei voneinander unabhängige Richtungen fortschreiten. Der Raum ist dreidimensional, die Zeit hingegen eindimensional. Aber selbst wenn man nur eine eindimensionale Projektion des an sich dreidimensionalen Raumes betrachtet, so besteht zwischen Raum und Zeit doch ein gravierender Unterschied. Ein materielles Teilchen kann z. B. im Raum an einer Stelle zu zwei verschiedenen Zeiten sein, es kann aber nicht umgekehrt zu einer Zeit an zwei verschiedenen Stellen des Raumes sein. Ebenso trennt die Bewegung eines Massenpunktes stets Vergangenheit und Zukunft auf der Zeitachse, nicht aber notwendigerweise links und rechts im Raum. Auch wenn wir in unserer Vorstellung den Zeitbegriff mit all seinen Facetten stets »verräumlichen«, so ist die Zeit doch etwas grundsätzlich anderes als ein eindimensionaler Raum.

Die Erfahrung, daß es keinen Bewegungsablauf gibt, der mit einer Zeitspiegelung, d. h. mit einer Umkehr der Zeitrichtung verbunden ist, bringt zum Ausdruck, daß dem Phänomen der »Zeitlichkeit« etwas Asymmetrisches anhaftet. Es ist die Anisotropie der Zeit, die es uns überhaupt erst ermöglicht, von der Zeit als einer Abfolge von Zuständen zu sprechen und so zwischen faktischen, d. h. vergangenen, und möglichen, d. h. zukünftigen, Ereignissen zu unterscheiden. In diesem Sinn werden wir den Begriff »Zeitstruktur« im folgenden verwenden.

Die Zeitlichkeit des Seins äußert sich offenbar allein in der *Irreversibilität*, d. h. in der Nichtumkehrbarkeit des natürlichen Geschehens. Wenn wir das Phänomen der Zeitstruktur verstehen wollen, dann müssen wir zuerst das Phänomen der Irreversibilität verstehen.

Ein anschauliches Beispiel für einen irreversiblen Prozeß ist in Abbildung 1 gezeigt. Jeder von uns wird die dort dargestellte Szenenfolge für realistisch halten. Niemand von uns wird jedoch behaupten, man könne die Szenenfolge auch in ihrem zeitlichen Ablauf umkehren, und diese würde dann ebenfalls einen realistischen Prozeß darstellen. Unser Glaube an die Nichtumkehrbarkeit der dargestellten Katastrophe hängt eben ganz wesentlich mit unserer Erfahrung zusammen, daß die Erzeugung von Unordnung der naturgemäße Weg für spontane Ereignisse ist und nicht die Erzeugung von Ordnung.

Wir wollen den dargestellten Prozeß physikalisch noch etwas eingehender interpretieren: Ein Motorradfahrer fährt mit hoher Bewegungsenergie gegen eine Mauer. Beim Aufprall wird die Bewe-

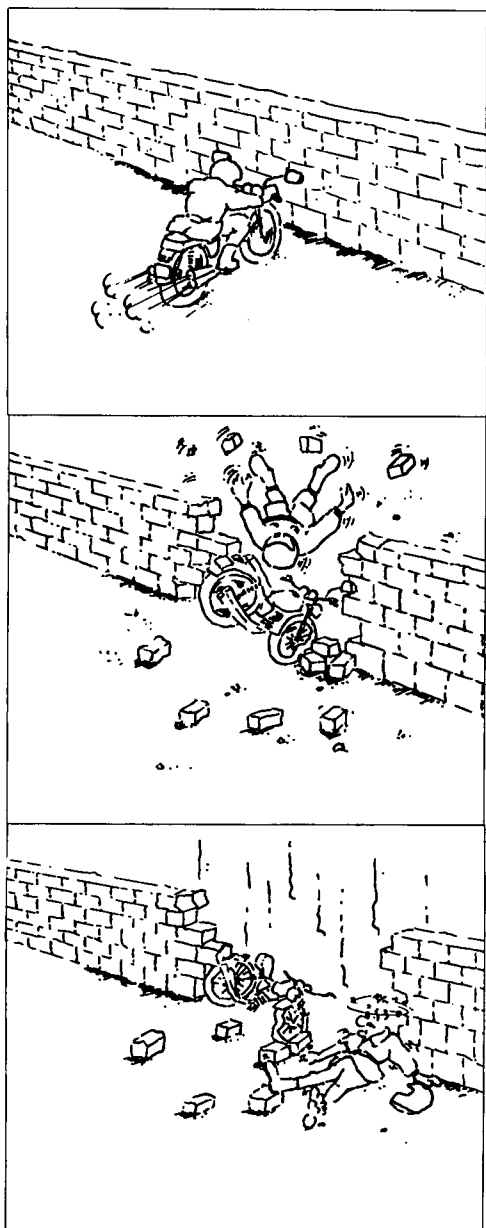


Abb. 1

gungsenergie in andere Energieformen umgesetzt, z. B. in die Energie, die erforderlich ist, um die Ziegelmauer und das Motorrad auseinanderzubrechen. Ein Teil der Bewegungsenergie wird aber auch verbraucht, um die beträchtliche Unordnung an der Unfallstelle zu erzeugen, und wiederum ein Teil der Bewegungsenergie fließt in die molekulare Bewegung der Metallteile des Motorradwracks, welche sich nach dem Unfall wärmer anfühlen als zuvor.

Der letzte Punkt ist für das physikalische Verständnis der Irreversibilität besonders wichtig. Wir müssen ihn deshalb präzisieren: Die Bewegungsenergie eines festen Gegenstandes, etwa eines Motorrads, entspricht der koordinierten Bewegung aller Moleküle in der gleichen Richtung, nämlich der makroskopisch sichtbaren Bewegungsrichtung. Beim Abbremsen, z. B. bei einem Aufprall, wird die koordinierte Bewegung der Moleküle in eine regellose Bewegung umgewandelt, bei der die einzelnen Moleküle nunmehr unruhig um kleine Strecken hin und her laufen, während der Schwerpunkt des Körpers in Ruhe bleibt. Das, was wir als Wärme empfinden, ist genau diese regellose Molekülbewegung.

Die Physiker haben das Phänomen der Irreversibilität der Naturprozesse in Richtung auf eine Zunahme der Unordnung als Gesetz über die Zunahme der sogenannten *Entropie* formuliert: In einem abgeschlossenen System, d. h. in einem System, das weder Energie noch Materie mit seiner Umgebung austauscht, laufen nur solche Prozesse spontan ab, bei denen die Entropie, d. h. die Unordnung des Systems, zunimmt. Man bezeichnet das Entropiegesetz auch als 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Sofern unser Universum in seiner Gesamtheit als ein abgeschlossenes System betrachtet werden kann, besitzt der 2. Hauptsatz den Rang eines universellen, kosmischen Entwicklungsgesetzes, das zugleich eine Richtung der Zeit (sogenannter thermodynamischer Zeitpfeil) auszeichnet.

Das Entropie-Gesetz und seine statistische Deutung

Wollen wir ein tieferes Verständnis des 2. Hauptsatzes und damit des Zeitphänomens gewinnen, müssen wir den physikalischen Begriff der »Unordnung« wesentlich schärfer fassen, als wir es bisher getan haben. Dies wiederum ist nur möglich, wenn wir etwas näher auf die molekulare Struktur der Materie und die Modelle ihrer physikalischen Beschreibung eingehen.

Eine wichtige Charakterisierung eines Materiesystems ist die Unterscheidung zwischen sogenannten Makro- und Mikrozuständen. Als *Makrozustand* bezeichnet der Physiker solche Zustände eines Systems, die durch eine makroskopisch meßbare Eigenschaft, wie z. B. Druck, Temperatur, Materiedichte usw., festgelegt sind. Andererseits lehrt uns die statistische Physik, daß sich solche makroskopischen Eigenschaften aus dem dynamischen Verhalten aller atomaren bzw. molekularen Partikel des Systems ableiten lassen. So ist die Temperatur eines Körpers gerade die mittlere Bewegungsenergie aller seiner Atome bzw. Moleküle, welche ihrerseits im wesentlichen durch die Geschwindigkeitsverteilung aller Partikel bestimmt ist.

Der Physiker bezeichnet eine definierte dynamische Verteilung aller Partikel eines Systems als *Mikrozustand*. Der Mikrozustand ist also durch die Angabe des Ortes und der Geschwindigkeit jedes einzelnen Atoms bzw. Moleküls des Systems charakterisiert. Nun sind in einem Kubikmeter eines Gases unter normalen Laborbedingungen schon über 10^{19} Gasmoleküle enthalten (die sogenannte Avogadro'sche Zahl), so daß für ein solches vergleichsweise kleines System die Angabe des Mikrozustandes bereits die Kenntnis von mehr als 10^{19} Meßwerten voraussetzen würde. Wegen der enorm großen Zahl von Partikeln kann man den Mikrozustand eines Systems somit nie kennen. Man kann aber sehr wohl statistische Aussagen über das Gesamtsystem machen, und diese Aussagen sind um so zuverlässiger, je größer die Zahl der im System enthaltenen atomaren bzw. molekularen Partikel ist.

Wichtig ist nun die Tatsache, daß ein bestimmter Makrozustand in der Regel durch mehr als nur *eine* dynamische Verteilung, also durch mehr als nur einen Mikrozustand, realisiert werden kann. Die Zahl der in einem Makrozustand enthaltenen Mikrozustände nennt man die *thermodynamische Wahrscheinlichkeit* des betreffenden Makrozustandes. Diese Bezeichnung soll zum Ausdruck bringen, daß ein willkürlich herausgegriffener Mikrozustand um so wahrscheinlicher zu einem bestimmten Makrozustand gehört, je mehr Mikrozustände der betreffende Makrozustand umfaßt.

Die Anzahl der in einem Makrozustand potentiell enthaltenen Mikrozustände läßt sich zugleich als ein Maß für Ordnung bzw. Unordnung des Systems auffassen. Ein geordnetes Materiesystem ist offenbar ein System, bei dem die Bestimmung des Makrozustandes

schon ziemlich genau auch den Mikrozustand festlegt. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Makrozustand nur wenige Mikrozustände enthält. Umgekehrt ist ein ungeordnetes Materiesystem ein solches, bei dem die Bestimmung des Makrozustandes nur geringe Rückschlüsse über den Mikrozustand, also die detaillierte Orts- und Geschwindigkeitsverteilung seiner Atome bzw. Moleküle zuläßt.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik sagt in seiner qualitativen Fassung aus, daß bei der spontanen Entwicklung eines Systems dieses immer von geordneten in weniger geordnete Zustände übergeht. Wie können wir dies nun unter dem Aspekt der soeben getroffenen Unterscheidung von Makro- und Mikrozuständen verstehen?

Nehmen wir einmal an, ein Materiesystem sei in einem bestimmten Augenblick in einem geordneten Zustand, d. h. in einem Makrozustand, dessen thermodynamische Wahrscheinlichkeit sehr klein ist. Die momentane dynamische Verteilung seiner Atome, d. h. der momentane Mikrozustand wird, da die Atome durch Stöße miteinander wechselwirken, sich ändern. Das System wird also in irgendeinen neuen Mikrozustand übergehen, von dem man zunächst nicht mehr weiß, als daß er einer der möglichen Nachbarzustände des ursprünglichen Mikrozustandes ist. Zu diesen Nachbarzuständen werden nun Makrozustände mit größerer und kleinerer thermodynamischer Wahrscheinlichkeit gehören. Wenn das System sich völlig selbst überlassen ist, wird es in der Mehrzahl der Fälle in solche Makrozustände übergehen, deren thermodynamische Wahrscheinlichkeit größer ist als die des vorhergehenden Makrozustands. Die Entwicklung wird erst dann zum Stillstand kommen, wenn das System den Makrozustand mit der größten thermodynamischen Wahrscheinlichkeit, d. h. der größtmöglichen Zahl von Mikrozuständen erreicht hat. Das System hat dann den größtmöglichen Grad von ungeordneter Bewegung, d. h. von Wärme erreicht.

Für den naturwissenschaftlich weniger versierten Leser sind die bisherigen Gedankengänge vielleicht noch reichlich abstrakt und unverständlich geblieben. Es sollen daher die bisherigen Ausführungen noch einmal anhand eines einfachen Spielmodells erläutert werden.¹ Wir verwenden für das Entropie-Spiel ein Spielbrett mit $8 \times 8 = 64$ Feldern (Abb. 2). Durch eine Koordinateneinteilung ist jede Position auf dem Spielbrett eindeutig festgelegt. Mit Hilfe eines Paares von Oktaeder-Würfeln kann jedes der 64 Felder erwürfelt werden. Die einzel-

8	●	○	●	○	●	○	○	●
7	○	●	○	●	●	●	○	○
6	●	●	○	○	●	○	●	○
5	○	○	●	●	●	●	●	○
4	●	○	○	○	○	●	○	●
3	●	○	●	○	○	●	○	●
2	○	○	○	○	●	○	●	○
1	●	●	●	●	●	○	○	●
	1	2	3	4	5	6	7	8

Abb. 2

Das Entropie-Spiel

nen Felder sind mit Kugeln verschiedener Farbe (z. B. Blau und Rot) besetzt. Bevor wir die Spielregeln für das Entropie-Spiel definieren, wollen wir uns überlegen, wie im Kontext unseres Spielmodells »Makrozustände« und »Mikrozustände« zu definieren sind.

Offenbar ist es sinnvoll, als Makrozustand das jeweilige Besetzungsverhältnis von blauen zu roten Kugeln zu bezeichnen. Bezeichnet man mit n_1 die Zahl der blauen Kugeln und mit n_2 die Zahl der roten Kugeln, dann ist der Makrozustand durch die Angabe des Zahlenpaars (n_1, n_2) festgelegt. Es gibt in unserem Spielmodell insgesamt 65 solcher Makrozustände (zu den 64 Besetzungsmöglichkeiten – bezogen auf eine der beiden Kugelfarben – muß man noch den

Fall der einheitlichen Besetzung mit der Komplementärfarbe, d. h. den Fall $n_1=0$ bzw. $n_2=0$ hinzuzählen). Ein Mikrozustand ist hingegen durch die genaue, nach Koordinaten spezifizierte Verteilung der Kugeln auf dem Spielbrett definiert. In diesem Fall müssen wir zu jeder Position auf dem Spielbrett angeben, mit welcher Kugelfarbe sie besetzt ist, Blau oder Rot. Man sieht sofort, daß die 65 Makrozustände des Spielmodells unterschiedlich viele Mikrozustände besitzen. Wenn beispielsweise das Spielbrett nur mit einer Kugelfarbe besetzt ist (Blau oder Rot), so gibt es trivialerweise auch nur jeweils eine Anordnungsmöglichkeit der Kugeln, d. h. *einen* Mikrozustand. Der Makrozustand (63, 1) läßt sich bereits durch 64 verschiedene Anordnungsmöglichkeiten realisieren. Die maximale Zahl von Anordnungsmöglichkeiten besitzt die Gleichverteilung (32, 32). Die Gleichverteilung läßt sich bereits durch mehr als 10^{18} Mikrozustände realisieren.

Doch nun zum Spiel selbst. Wie bei natürlichen Materiesystemen demonstrieren wir das Anwachsen der Unordnung, indem wir von einem Zustand höherer Ordnung ausgehen. Im Extremfall besetzen wir das Spielbrett zu Beginn nur mit Kugeln einer Farbe, z. B. blauen Kugeln. Wir definieren nun folgende Spielregel: Jede Kugel, deren Koordinaten erwürfelt werden, muß vom Spielbrett entfernt und durch eine Kugel der anderen Farbe ersetzt werden.

Das Spiel ist nicht besonders kurzweilig. Man simuliert es daher zweckmäßigerweise auf dem Computer. Die Computersimulation endet immer mit folgendem Ergebnis: Unabhängig von der jeweiligen Ausgangssituation stellt sich nach einer hinreichenden Zahl von Würfen eine Gleichverteilung zwischen blauen und roten Kugeln ein. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Gleichgewicht, d. h. im Mittel werden in Gleichgewichtsnähe ebenso viele blaue (bzw. rote) Kugeln das Spielbrett verlassen, wie rote (bzw. blaue) Kugeln ins Spiel kommen.

Natürlich ist das Ergebnis durch die Regeln des Entropie-Spiels vorprogrammiert. Immer wenn eine Abweichung von der Gleichverteilung auftritt, wächst proportional dazu die Wahrscheinlichkeit für ihre Reduktion. Die Schwankungen um den Gleichgewichtswert sind selbstregulierend.

Zugleich sehen wir an diesem Spielmodell deutlich, wie das Phänomen der Irreversibilität zustande kommt. Die Spielregeln selbst zeichnen keinen Mikrozustand gegenüber dem anderen aus. Im Zeitmittel werden daher aller Mikrozustände gleich häufig durchlau-

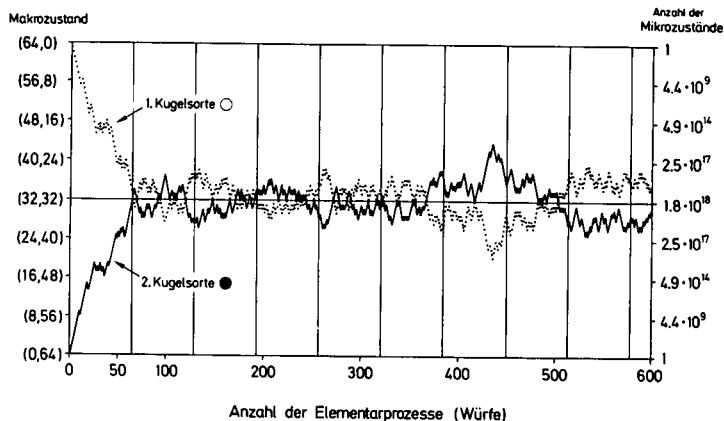


Abb. 3 **Ergebnis des Entropie-Spiels**

fen. Die Irreversibilität, die ja nur auf der Ebene der Makrozustände in Erscheinung tritt, kommt allein dadurch zustande, daß die einzelnen Makrozustände (Abbildung 3, linke Ordinate) unterschiedlich viele Mikrozustände (rechte Ordinate) enthalten. Wenn nämlich alle Mikrozustände eines Systems mit gleicher A-priori-Wahrscheinlichkeit erreicht werden, werden wir das System in der Mehrzahl der Fälle in dem Makrozustand vorfinden, der die größte Zahl von Mikrozuständen enthält.

Ludwig Boltzmann, der zu den Begründern der statistischen Physik gehört, hat vorgeschlagen, die Entropie als eine strengzunehmende Funktion des statistischen Gewichts einer Verteilung zu interpretieren: Entropie eines Makrozustandes $\sim$ Zahl seiner Mikrozustände.

Mit diesem Ansatz wird die deterministische Aussage des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik, daß die Entropie eines abgeschlossenen Systems niemals abnehmen kann, auf einen Satz der statistischen Physik zurückgeführt, und zwar auf die Behauptung, daß auf einen Makrozustand höheren Gewichts extrem selten ein Makrozustand merklich niedrigeren Gewichts folgt.

Für den Fall eines verdünnten Gases hatte Boltzmann auch eine Funktion (sog. H-Funktion) angeben können, welche die Einstellung

der Gleichgewichtsverteilung aus der Mechanik der Stöße zwischen den Gasparkeln beschreibt und die als Folge der Stoßprozesse einseitig abnimmt.² Die H-Funktion hat – nach Umkehr des Vorzeichens – die Eigenschaft der Entropiefunktion, nämlich mit wachsender Zeit einseitig zuzunehmen. Im Gleichgewichtszustand ist die H-Funktion (bis auf einen konstanten Faktor und das negative Vorzeichen) sogar identisch mit der klassischen Entropie.

Gegen die statistische Deutung der Entropie, insbesondere ihrer molekularkinetischen Deutung mittels der H-Funktion, sind zwei gewichtige Einwände vorgebracht worden:

(1) Der »Umkehrreinwand« macht geltend, daß man die Irreversibilität des Naturgeschehens nicht aus einer inhärent reversiblen Theorie wie die der klassischen Mechanik ableiten könne.³ Nach den Prinzipien der Mechanik ist nämlich zu jeder Bewegung auch die in der Zeit umgekehrt verlaufende Bewegung möglich. Folglich läßt sich zu einem Materiesystem, für welches die H-Funktion monoton abnimmt, immer ein in seinem Bewegungsablauf gespiegeltes System konstruieren, für das die H-Funktion monoton zunimmt.

(2) Der »Wiederkehrreinwand« bezieht sich auf die Tatsache, daß jeder Mikrozustand eines endlichen Materiesystems, also auch die extrem unwahrscheinlichen Verteilungen, nach einer hinreichend langen Zeit innerhalb beliebig kleiner Schwankungsgrenzen wiederkehrt.⁴

Der Wiederkehrreinwand ist zwar (von einigen Sonderfällen abgesehen) richtig, aber irrelevant. Boltzmann konnte nämlich zeigen, daß schon für kleine Materiesysteme die Wiederkehrzeiten extrem groß sind und die bisherige Lebensdauer unseres Universums weit überschreiten. Dem Umkehrreinwand begegnete Boltzmann mit dem Argument, daß die Irreversibilität des Naturgeschehens in der Tat nicht aus den Prinzipien der Mechanik *allein* abgeleitet werden könne, sondern nur unter der Zuhilfenahme zusätzlicher Annahmen über die Anfangsbedingungen des Systems. Die statistischen Überlegungen, auf denen der Boltzmannsche Stoßzahlenansatz beruht, setzen nämlich implizit voraus, daß die Partikel *vor* dem Zusammenstoß unabhängig voneinander sind, d. h., daß es zwischen ihren Geschwindigkeiten keine Korrelationen gibt (Hypothese vom molekularen Chaos). Wenn man jedoch dem Umkehrreinwand entsprechend das System in seinem mikrophysikalischen Bewegungsablauf spiegelt,

dann liegt insofern eine vom molekularen Chaos abweichende Situation vor, als nunmehr die Partikel ein zielgerichtetes Verhalten zeigen, indem von vornherein festliegt, welche Partikel zu welcher Zeit miteinander wechselwirken und welche Geschwindigkeitsänderung sie beim Zusammenstoß erfahren.

Das H-Theorem hängt also in seiner ganzen Tragweite von der Erfüllung der Bedingungen des molekularen Chaos ab. Es ist nur dann gültig, wenn die Voraussetzungen des Stoßzahlenansatzes erfüllt sind, d. h. wenn es vor dem Zusammenstoß zwischen den Molekülen keinerlei Korrelationen gibt. Andererseits – und dies ist das Dilemma – erzeugen die Stöße aber gerade solche verbotenen Korrelationen.

Die Diskussion hat uns hier unmittelbar in das Zentrum eines schwierigen physikalischen Grundlagenproblems geführt. Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen, wollten wir die Diskussion des H-Theorems weiter vertiefen. Halten wir vielmehr fest: Die statistische Deutung der Entropie zeigt, daß die makroskopischen Vorhersagen des 2. Hauptsatzes zwar mit erdrückender Wahrscheinlichkeit, nicht aber mit absoluter Sicherheit gelten.

Unser Entropie-Spiel bringt diesen Aspekt klar zum Ausdruck. Nach der deterministischen Formulierung des 2. Hauptsatzes ist die Entropie eine mit der Zeit streng zunehmende Funktion. Im Entropie-Spiel, das wegen der niedrigen »Teilchenzahl« den statistischen Charakter der Irreversibilität sichtbar macht, zeigt die Entropie-Funktion hingegen Schwankungen um den nach dem deterministischen Gesetz zu erwartenden Kurvenverlauf. Ausgehend von einer extremen Anfangsbedingung nimmt die Entropie-Funktion im Mittel stark zu und schwankt, nachdem der Einfluß der Anfangsbedingungen abgeklungen ist, um den Maximalwert, d. h. um den wahrscheinlichsten Wert der Gleichgewichtsverteilung.

Ein physikalisches Beispiel für das sichtbare Auftreten solcher Entropie-Schwankungen ist die Brownsche Molekularbewegung, die man an winzigen, in einem Gas oder einer Flüssigkeit suspendierten Teilchen beobachten kann. Die unregelmäßige, hin und her zitternde Bewegung der Teilchen entsteht durch die zufälligen Stöße, die die suspendierten Teilchen von den Molekülen des Mediums erhalten. Betrachtet man nun ein kleines Teilvolumen, so schwankt die Konzentration der suspendierten Teilchen um einen Mittelwert, da die zufällige Brownsche Bewegung nicht immer gleich viele Teilchen aus

dem Volumenelement heraus- und hereintransportiert. Ist die mittlere Anzahl der sichtbar suspendierten Teilchen klein, so sind die Konzentrationsschwankungen um den Mittelwert relativ groß und leicht zu beobachten. Das Blau des Himmels, das durch Lichtstreuung hervorgerufen wird, hat seine Ursache übrigens ebenfalls in solchen Schwankungserscheinungen.

Das Problem der Zeitstruktur aus kosmologischer Sicht

Das H-Theorem, dies war die Quintessenz der vorausgegangenen Überlegungen, kann nur in einem statistischen Sinn gültig sein. Wäre das H-Theorem tatsächlich für alle Zeiten streng gültig, dann folgte daraus, daß ein System, welches sich im Gleichgewicht befindet, zu keiner Zeit von seinem Gleichgewichtszustand abweichen kann. Dies würde beispielsweise bedeuten, daß ein vom Dach gefallener Dachziegel sich niemals spontan als Folge von Schwankungen in die Luft erhebt – eine Schlußfolgerung, die mit unserer Erfahrung im Einklang steht; es würde aber zugleich auch bedeuten, daß es keine Brownsche Molekularbewegung, keinen blauen Himmel gibt – eine Schlußfolgerung, die falsch ist. Die statistische Deutung der Entropie zeigt also bei einer genauen, molekulardynamischen Betrachtung keine Asymmetrie des Geschehens, sondern gerade das Gegenteil, die volle Symmetrie.

Boltzmann hat für das Problem, daß die Gesetze der Mechanik reversibel, das wirkliche Geschehen jedoch irreversibel ist, zwei, unsere Welt als Ganzes betreffende Lösungshypothesen angegeben, die *Schwankungshypothese* (a) und die *Anfangshypothese* (b).⁵ Nach der Schwankungshypothese ist unsere Welt aus einer großen, aber lokal begrenzten Entropie-Schwankung im Universum hervorgegangen. Bei der Bildung und Auflösung dieser Schwankungen ist der Verlauf des Naturgeschehens einsinnig und wird als Anisotropie der Zeit empfunden. Nach der Anfangshypothese ist unser gesamtes Universum aus einem sehr unwahrscheinlichen Anfangszustand hervorgegangen. Die Entwicklung zum thermodynamischen Gleichgewicht (sogenannter Wärmetod des Universums) ist einseitig und bestimmt eine Richtung der Zeit.

(a) Betrachten wir zunächst die *Schwankungshypothese*. Das Universum wird als abgeschlossenes System und vollkommen symmetrisch in

Raum und Zeit angesehen. Die Symmetrieannahme hinsichtlich der Zeit bedeutet, daß auf der Zeitkoordinate keine Richtung des Geschehens ausgezeichnet ist, ebenso wenig wie es eine Richtung im Raum gibt. Weiterhin wird angenommen, daß sich das Universum (gleichsam als ein Gas aufgefaßt) im thermodynamischen Gleichgewicht, also in einem Zustand maximaler Unordnung befindet. Um das Gleichgewichtsniveau herum gibt es jedoch Schwankungen in der Entropie, d. h. Raum-Zeit-Gebiete, in denen eine von der maximalen Unordnung abweichende Ordnung besteht. In Anbetracht der unendlichen Weite von Raum und Zeit ist es wahrscheinlich, daß auch einmal Entropie-Schwankungen von der Größe ganzer Sternsysteme oder, wie Boltzmann sie nannte, »Einzelwelten« auftreten.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß wir Menschen in einer solchen Einzelwelt leben, ist trivialerweise dann groß, wenn wir annehmen, daß das Leben überhaupt nur in Raum-Zeit-Gebieten möglich ist, die sich fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden, denn nur in solchen Gebieten gibt es eine physikalische Strukturierung der Welt, z. B. Temperatur- und Dichteunterschiede, wie sie zur Aufrechterhaltung lebender Systeme notwendig ist. Diese Situation ist beispielsweise in den beiden Flanken einer großen Entropie-Schwankung gegeben.

Nun kann man argumentieren, daß die Wahrscheinlichkeit, daß wir in einer Phase abnehmender Entropie leben, ebenso groß ist wie die Wahrscheinlichkeit, daß wir in einer Phase zunehmender Entropie leben. Folglich kann im Universum auch keine Zeitrichtung objektiv ausgezeichnet sein.

Diesem Einwand begegnet Boltzmann mit dem Argument, daß wir Menschen die Zeitausrichtung *subjektiv* erleben, und zwar in der Richtung zunehmender Entropie: »Für das Universum sind also beide Richtungen der Zeit ununterscheidbar, wie es im Raum kein Oben oder Unten gibt. Aber wie wir an einer bestimmten Stelle der Erdoberfläche die Richtung gegen den Erdmittelpunkt als nach unten bezeichnen, so wird eine Lebewesen, das sich in einer bestimmten Zeitphase einer solchen Einzelwelt befindet, die Zeitrichtung gegen die unwahrscheinlicheren Zustände anders als die entgegengesetzte (erstere als die Vergangenheit, den Anfang, letztere als die Zukunft, das Ende) bezeichnen . . .«⁶ Boltzmann vertritt hier also die These, die Richtung der Zeit sei definitorisch festgelegt.

K. Popper hat die Boltzmannsche Schwankungshypothese als einen durch nichts zu rechtfertigenden Subjektivismus abgelehnt. Er schreibt: »Ich finde Boltzmanns Idee in ihrer Kühnheit und Schönheit atemberaubend. Ich finde aber auch, daß sie vollkommen unhaltbar ist, zumindest für einen Realisten. Sie macht aus der in nur einer Richtung verlaufenden Veränderung eine Illusion. Das macht aber auch aus der Katastrophe von Hiroshima eine Illusion. Es macht aus unserer Welt eine Illusion, und damit auch aus *allen unseren Bemühungen, mehr über unsere Welt herauszufinden.*«⁷

Nun läßt sich darüber streiten, ob Boltzmann, wie Popper behauptet, einem blanken Subjektivismus das Wort redet.⁸ Diese Frage ist auch lediglich von wissenschaftshistorischem Interesse; denn schon mit einer einfachen wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegung läßt sich nachweisen, daß das Schwankungsmodell nicht haltbar ist. Wie C. F. von Weizsäcker gezeigt hat, führt nämlich eine konsequente Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf das Boltzmannsche Schwankungsmodell zu widersprüchlichen Schlußfolgerungen.⁹

Boltzmann legt ja seiner Schwankungshypothese eine Entropie-Schwankung von der Größe unseres Weltsystems zugrunde. Nun deuten die Dokumente (z. B. Fossilien), die wir besitzen, darauf hin, daß unsere Welt ein bestimmtes Entwicklungsalter besitzt, sich demnach auch nicht mehr in ihrem Anfangszustand tiefster Entropie befinden kann. Nach der Boltzmannschen Theorie ist ein Entropie-Zustand in Gleichgewichtsnähe, d. h. eine kleine Schwankung, jedoch sehr viel wahrscheinlicher als eine große Schwankung, wie z. B. der Anfangszustand unserer Welt. Demnach muß es im Universum viel mehr Einzelwelten geben, deren Anfangszustand gerade der augenblickliche Zustand unserer Welt mit all ihren Einzelheiten ist. Daraus folgt wiederum, daß es wahrscheinlicher ist, daß alle Dokumente unserer Welt durch eine zufällige Schwankung entstanden sind, als daß die vorhergehenden Zustände geringerer Entropie, auf die wir aus der Existenz von Dokumenten schließen, tatsächlich realisiert waren. Nach der Schwankungshypothese ist also mit der weitaus größeren Wahrscheinlichkeit die Gegenwart gerade das Entropie-Minimum und die Vergangenheit, auf die wir aus den Dokumenten schließen, eine Illusion – ein Schluß, der die Schwankungshypothese *ad absurdum* führt.

(b) Betrachten wir nunmehr die *Anfangshypothese*. Wir hatten schon beim Entropie-Spiel gesehen, daß der irreversible Gesamtcharakter des Spiels lediglich eine Folge der extremen Anfangsbedingungen war. Auf kosmische Dimensionen verallgemeinert, führt die Anfangshypothese zu der Vorstellung, daß der Anfangszustand des Universums ein unwahrscheinlicher Makrozustand mit einem Minimum an Entropie gewesen ist (z. B. könnte man sich vorstellen, daß zu Anfang die gesamte Materie auf ein kleines Volumen konzentriert war). Die Annahme eines solchen absoluten Entropie-Minimums als Bedingung für den Anfangszustand impliziert dann, wie in unserem Entropie-Spiel, eine permanente Entropie-Zunahme und damit eine eindeutige Strukturierung der Zeitkoordinate in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Daß der 2. Hauptsatz offenbar auch für große Ausschnitte des Universums gilt, liegt dann daran, daß das Universum, wie es F. Hund einmal ausgedrückt hat, »noch sehr jung ist«.¹⁰

Der unbefriedigende Aspekt der Anfangshypothese besteht darin, daß die Existenz der exzeptionellen Anfangsbedingungen naturwissenschaftlich nicht weiter hinterfragbar ist. Von diesem Umstand einmal abgesehen, zeigt die genauere Analyse, daß die Anfangshypothese das Problem der Zeitstruktur nicht wirklich lösen kann. Denn man wird nur dann bereit sein, diese Erklärungshypothese zu akzeptieren, wenn man daran glauben darf, daß der von ihr postulierte extreme Anfangszustand unserer Welt auch wirklich existiert hat.

Nun können wir aber auf die Entwicklungsgeschichte unserer Welt wiederum nur mit Hilfe von Dokumenten schließen (z. B. der 3°K-Hintergrundstrahlung des Universums, die gewissermaßen das elektromagnetische »Echo« des Urknalls darstellt). Solche Beobachtungen haben aber nur dann den Wert eines Dokumentes, wenn wir die Existenz einer Zeitstruktur, d. h. die Möglichkeit der objektiven Unterscheidung von faktischen und möglichen Ereignissen voraussetzen dürfen, also das, was wir aus der Anfangshypothese ja gerade ableiten wollen.

Unsere Diskussion scheint hier in einen *circulus vitiosus* zu geraten. Auf der einen Seite erweist sich die Struktur der Zeit als ein Phänomen, das uns in Form eines Erfahrungssatzes, nämlich des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik, begegnet. Auf der anderen Seite stellen wir fest, daß die Struktur der Zeit offenbar eine Grundbedin-

gung der Möglichkeit von Erfahrung ist, somit die im 2. Hauptsatz formulierte Erfahrung erst ermöglicht hat. Wie können wir aus diesem Begründungszirkel herausfinden?

Die Antwort auf diese Frage lautet: nur mit Hilfe einer Konsistenzüberlegung. Es besteht keinerlei Aussicht, die Existenz der Zeitstruktur aus den physikalischen Grundgesetzen abzuleiten. Vielmehr müssen wir den Konsistenznachweis führen, daß, wenn der 2. Hauptsatz ein allgemeingültiges Naturgesetz ist, die Zeit die von uns geschilderte Struktur haben *kann*.

C. F. von Weizsäcker, auf den diese Überlegungen zurückgehen, führt den Konsistenznachweis mittels einer schärferen Fassung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes.¹¹ Danach läßt sich zeigen, daß die Irreversibilität des Naturablaufs mit der zeitlichen Symmetrie der mechanischen Grundgesetze für den Fall vereinbar wird, daß man in der statistischen Deutung des Entropie-Gesetzes die Wahrscheinlichkeitsrechnung nur auf die Berechnung *realer* Übergänge, d. h. auf Übergänge in die jeweilige Zukunft anwendet. Hieraus folgt dann zunächst das Anwachsen der Entropie für die Zukunft. Da andererseits jeder vergangene Augenblick auch einmal Gegenwart war, folgt hieraus das Anwachsen der Entropie für alles, was damals in der Zukunft lag, also auch für Zeiten, die heute zur Vergangenheit gehören.

C. F. von Weizsäcker macht bei seinem Konsistenznachweis lediglich von der These Gebrauch, daß sich der Wahrscheinlichkeitsbegriff in sinnvoller Weise nur auf zukünftige, d. h. mögliche Ereignisse anwenden läßt, weil es sinnlos ist, nach der Wahrscheinlichkeit vergangener, d. h. faktischer Ereignisse zu fragen. Die zeitasymmetrische Verwendung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes, die sich an der Realität von Dokumenten orientiert, ist die Stelle, an der dann die Zeitstruktur in die statistische Begründung des 2. Hauptsatzes einfließt.

Fassen wir unsere bisherigen Schlußfolgerungen noch einmal zusammen; Die Struktur der Zeit, wie sie sich im Unterschied von Vergangenheit und Zukunft manifestiert, ist aus den Grundgesetzen der Physik nicht ableitbar. Sie muß vielmehr als eine *a priori* vorhandene und objektive Eigenschaft des Naturgeschehens vorausgesetzt werden.

Die Zeit in der Zeitlichkeit von Erfahrung

Mit unserer implizit ausgedrückten These, daß die Anisotropie der Zeit eine Grundbedingung der Möglichkeit von Erfahrung schlechthin ist, nähern wir uns sehr stark der Kantschen These, wonach unsere Anschauungsformen von Raum und Zeit Gegebenheiten sind, die *a priori* festliegen und die die Form all unserer Erfahrung bestimmen, ja Erfahrung als solche überhaupt erst möglich machen.

Man könnte geneigt sein, hierin den Ansatz für eine subjektivistische Zeitphilosophie zu sehen, die zu unserem bisherigen Bestreben, die Zeitstruktur objektiv zu begründen, in einem gewissen Widerspruch steht. Dieser besteht jedoch nur scheinbar. Der Widerspruch löst sich auf, wenn wir die Kantsche These im Licht der Evolution betrachten. Danach muß unser »Weltbildapparat«, d. h. das menschliche Gehirn und seine spezifischen Bewußtseinsleistungen, als das Ergebnis einer langen stammesgeschichtlichen Entwicklung angesehen werden. Insbesondere hat das Gehirn die Aufgabe, Informationen über die Außenwelt wahrzunehmen, zu speichern und in eine geeignete Überlebensstrategie für den Organismus umzusetzen. Diese Aufgabe kann unser »Weltbildapparat« jedoch nur dann erfüllen, wenn er die reale Außenwelt möglichst strukturgetreu abbildet. Unter dem Gesichtspunkt der evolutionären Anpassung eines Organismus an seine Umweltbedingungen läßt sich unser Zeitbewußtsein und das hieraus hervorgehende kausale Denken tatsächlich nur mit der Existenz einer objektiv gegebenen zeitasymmetrischen Wirklichkeit in Einklang bringen. Allerdings kann auch dieser Schluß nur mit Hilfe eines Konsistenznachweises gerechtfertigt werden, denn unsere naturwissenschaftlichen Theorien, insbesondere auch die Evolutionstheorie, sind ja selbst wieder Produkte unseres »Weltbildapparates«, dessen Struktur und Funktion wir mit Hilfe eben dieser Theorie beschreiben. Im Licht der Evolution erscheinen also die Kantschen Apriori des Individuums als Aposteriori der Stammesgeschichte, womit unsere Anschauungsform der Zeit wiederum einer objektiven Analyse im Rahmen der Biowissenschaften zugänglich ist.¹²

Nun besitzen wir jedoch ohne Zweifel ein sehr viel komplexeres Zeitbewußtsein, als es sich in der eindimensionalen Zeitordnung von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ausdrückt. Es stellt sich die Frage, ob wir, von der Existenz einer eindimensionalen physikali-

schen Zeitstruktur ausgehend, die gesamte Fülle und Komplexität unseres Zeitbewußtseins verstehen können.

Eine Lösung dieses Problems wird sichtbar, wenn wir die Zeit selbst zum Gegenstand von Erfahrung machen, und zwar der lebendigen Erfahrung des Menschen. Wenn die bisher entwickelte These richtig ist, daß Erfahrung nur in einer zeitstrukturierten Wirklichkeit möglich ist, dann muß die Erfahrung der Zeitstruktur, d. h. die Erfahrung von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft als ein Prozeß, der in der Zeit ist, selbst wieder zeitstrukturiert sein. Es muß dann einen Sinn machen, von der Verschränkung der Zeitmodi zu sprechen, also beispielsweise von der Vergangenheit der Gegenwart (VG), der Gegenwart zur Gegenwart (GG) sowie der Zukunft zur Gegenwart (ZG).¹³ Dies gilt in analoger Weise auch für die beiden übrigen Zeitmodi (Vergangenheit und Zukunft), so daß sich insgesamt neun Verschränkungen 1. Ordnung ergeben.

Nun ist das Sein, das sich in den Verschränkungen 1. Ordnung manifestiert, wiederum ein Sein in der Zeit, welches in der Dreiheit ihrer Modi erscheinen muß. Hieraus resultieren die siebenundzwanzig Verschränkungen 2. Ordnung, die die Zeitmodi dreifach enthalten. Der Prozeß der Verschränkung der Zeitmodi läßt sich beliebig oft iterieren, wodurch sich ein in sich homogenes, multidimensionales Zeitgefüge aufbaut, welches keinerlei obere Grenze besitzt. Die eindimensionale Projektion des an sich multidimensionalen Zeitgefüges bildet die physikalische Zeit in der Dreiheit ihrer Modi Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft ab. Nur diesen physikalisch objektivierbaren Anteil des Zeitgefüges können wir metrisieren und damit messen.

Durch die Verschränkung der Zeitmodi wird der eindimensionalen Zeitstruktur eine hierarchisch organisierte Feinstruktur aufgeprägt, die sich allein in der Organisation unseres Bewußtseins manifestiert. Eine konsequente Fortführung dieses Gedankens führt uns zu der These, daß das Sein und die Zeit nicht voneinander unabhängig sind, sondern daß das Sein die Zeit *ist*. Das Sein ist nicht bloß das Substrat, auf das die Zeit einwirkt, sondern das Sein konstituiert sich erst durch die Zeit. Die Frage nach der ontologischen Deutung der Zeitverschränkungen öffnet ein weites Feld für zeitphilosophische Untersuchungen, zu denen interdisziplinäre wie transwissenschaftliche Veranstaltungen wertvolle Impulse liefern können.

Anmerkungen

Der vorliegende Text ist die stark gekürzte Fassung meines Vortrags, gehalten am 15. 12. 1984 auf dem von der Universität Venedig veranstalteten Symposium *IL TEMPO MORENTE – DIE STERBENDE ZEIT*; die vollständige Fassung ist unter gleichlautendem Titel in *FUTURA*, Informationen aus dem Boehringer Ingelheim Fonds über Forschung und Wissenschaftspolitik, Heft 4 (1986) erschienen.

- 1 M. Eigen, R. Winkler-Oswatitsch: *Das Spiel*. Piper Verlag, München 1975.
- 2 L. Boltzmann: *Wien. Ber.* 66, S. 275 (1872).
- 3 J. Loschmidt: *Wien Ber.* 73, S. 139 (1876).
- 4 E. Zermelo: *Ann. Phys.* 57, S. 485 (1896).
- 5 L. Boltzmann: *Ann. Phys.* 60, S. 392 (1897).
- 6 L. Boltzmann: *a. a. O.*, S. 396.
- 7 K. Popper: *Ausgangspunkte*. Hoffmann und Campe Verlag, Hamburg 1979, S. 233.
- 8 Vgl. M. Curd: Popper on Boltzmann's Theory of the Direction of Time. In: Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe, Bd. 8, *Ausgewählte Abhandlungen der Internationalen Tagung in Wien 1981*, R. Sexl u. J. Blackmore (Hrsg.). Akademische Druck- und Verlagsanstalt, Graz 1982.
- 9 C. F. v. Weizsäcker: *Annalen der Physik* 36, S. 275 (1939). Eine ähnliche Argumentation findet sich schon bei M. Bronstein und L. Landau: *Sow. Phys.* 4, S. 114 (1933).
- 10 F. Hund: *Grundbegriffe der Physik*. Bibliographisches Institut, Mannheim 1969, S. 140.
- 11 C. F. von Weizsäcker: *Einheit der Natur*. Hanser Verlag, München 1971.
- 12 K. Lorenz: *Bl. f. Deutsche Philosophie* 15, S. 94 (1941).
- 13 G. Picht: *Die Zeit und die Modalitäten*. In: *Quanten und Felder*, H. P. Dürr (Hrsg.). Vieweg, Braunschweig 1971.

Abbildungsnachweise

Abb. 1 in Anlehnung an: R. E. Dickerson und I. Geis: *Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung*. Verlag Chemie, Weinheim 1981.

Abb. 2 nach M. Eigen: *Berichte Bunsengesellschaft Phys. Chemie*, 1059 (1976).

1. Historische Hinweise

Noch steckt die Naturwissenschaft in ihren Kinderschuhen; gerade vier Jahrhunderte sind vergangen, seit sie sich von der tausendjährigen Mutter Philosophie gelöst hat, und immer noch ist die Sehnsucht nach dem großen Schoß lebendig und manifestiert sich auf vielfache Weise: von der Klage Pascals über »zuwenig Menschlichkeit« über die These von den »Zwei Kulturen« Snows bis zu den vielen Versuchen zu alten und neuen Allianzen. Es gibt jedoch einen idealen Ort, an dem diese ersehnten Begegnungen stattgefunden haben, stattfinden und auch in Zukunft stattfinden können; wo die junge Wissenschaft und ihre alte Mutter sich treffen können, um gemeinsame Probleme anzugehen und zu lösen; es ist das Studium der Zeit, die so essentiell wie mysteriös ist und von der wir, nach zweitausend Jahren, nur wissen, daß wir sie noch nicht verstanden haben.

Ich will hier kurz daran erinnern, wie die Naturwissenschaft und die Philosophie wechselweise über die Jahrhunderte zu den Spekulationen über diesen fundamentalen, schwierigen und auch heute noch problematischen Begriff beigetragen haben.

In der Antike ist es die Physik, damals von der Philosophie noch ungeschieden, die in Form der aristotelischen ›Zahl der Bewegung im Hinblick auf das Vorher und Nachher‹ eine erste Definition der Zeit versucht. Aber das Erkenntnisinteresse richtete sich auf die äußere wie auf die innere Welt, und für letztere gilt diesmal eine philosophische Definition der Zeit als »Intuition des Werdens«, die sich schon bei Plotin findet und die dann bei Augustinus wiederkehrt, mit der expliziten Reduktion der Zeit auf das Bewußtsein (»extensio animae«) und der drei aristotelischen Zeitstufen auf drei Arten der Intuition der Gegenwart. Die Idee von den zwei Zeiten, der externen und der inneren Zeit, durchzieht die gesamte Philosophie des Mittelalters und der Renaissance.

Nach einer fast zweitausendjährigen Hegemonie der aristotelischen Philosophie, während der man von der Naturphilosophie nur logische Konsistenz und prognostische Sicherheit, aber nicht notwendigerweise Einheit verlangte², wird in der Renaissance die platonische Welt der

Ideen wiederentdeckt, bemächtigt sich die Naturwissenschaft, mit Galilei, Kepler und Newton, der pythagoreisch-platonischen Tradition und sucht in der Einheit der Gesetze die »Idee«, aus der sich, entlang einer Kausalitätsskala, die Phänomene der Natur ableiten lassen. Dieses ist der erste autonome Beitrag der Naturwissenschaft zum Begriff der Zeit als kausaler Ordnung: die Ursache geht, in der Zeit, ihrer Wirkung voraus.

Diese Korrelation der zeitlichen Ordnung (ihre »Sukzessivität«) mit der kausalen Ordnung wird von Kant in die Philosophie übernommen und bildet das Fundament seiner Vorstellung von der zeitlichen Ordnung der Natur (und der Gleichzeitigkeit).

Den nächsten Schritt tut die Physik, nun zur autonomen Disziplin erwachsen; sie behält die Identifikation von zeitlicher und kausaler Ordnung bei, präzisiert jedoch mit Einstein den Begriff der Gleichzeitigkeit, sobald sie experimentell (Michelson) nachweist, daß die Ursache »sich in der Raum-Zeit niemals mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die größer als die Lichtgeschwindigkeit ist«. Die spezielle Relativitätstheorie formuliert: »Zwei Ereignisse, die nicht durch ein kausales Signal verbunden werden können (das sich mit einer Geschwindigkeit unterhalb oder gleich der Lichtgeschwindigkeit fortbewegt), können nicht absolut in der Zeit geordnet werden, sondern nur relativ zu dem, der die Messungen vornimmt.« Gleichzeitigkeit ist folglich kein absoluter, sondern nur ein relativer Begriff, zumindest für die Erkenntnis, die aus der der Physik eigenen empirischen Erfahrung entspringt und die unvermeidlicherweise wenig später auch in das philosophische Denken eindringt.

Die naturwissenschaftliche Kritik der Gleichzeitigkeit schlägt sich auch in der philosophischen Spekulation nieder: wenn mehrere zeitliche Ordnungen möglich sind, dann kann die Zeit auch als »Struktur der Möglichkeit« (Heidegger) und als Entwurf der Zukunft verstanden werden. Heute zeichnet sich, etwa in den Arbeiten Prigogines, ein neuer Beitrag der Physik mit der kreativen Rolle der Mikrofluktuationen in Dissipationsprozessen ab.

Aber auch die Idee von den zwei Zeiten, der äußeren der Bewegung und der intuitiven inneren, die Augustinus in die Philosophie eingeführt und Bergson aufgenommen und ausgearbeitet hat, ist von der Physik präzisiert worden. Schon Newton unterschied zwischen »absoluter Zeit«, die keine Beziehung zu äußeren Dingen unterhält und die

er »Dauer« nannte, und »relativer« Zeit, die anhand der Bewegung meßbar ist. Der entscheidende Beitrag zur Idee der inneren Zeit gebührt jedoch der Thermodynamik der irreversiblen Dissipationsprozesse: irreversibel heißt nämlich »in der Zeit geordnet«. Zu diesen Prozessen zählt auch das menschliche Leben: das Leben ist ein Dissipationsprozeß, es bedarf der Sonnenenergie, um anzudauern. Deshalb, behauptet die Physik, zeigt der Pfeil der inneren Zeit des Menschen irreversibel von der Geburt zum Tode, unabhängig von jeder äußeren Bewegung (Prigogine).

Mit diesem kurzem Durchgang durch die Geschichte des Zeitbegriffs sollte daran erinnert werden, wie sehr das Thema Zeit seit jeher der natürliche und privilegierte Ort war, an dem sich Philosophie und Physik begegnet sind, indem diese wiederum aufnahm und präzierte, was jene vorher intuitiert hatte. Wie die Zeit jedoch der Begegnungsort für Physik und Philosophie war, so war sie es auch für Philosophie und Mythos, Religion und Poesie, und dies unter einem Aspekt der Zeit, den ich bis jetzt außer acht gelassen habe, nämlich unter dem der Ewigkeit.

Platon führt den Begriff der Zeit als »bewegliches Abbild der Ewigkeit« ein, denn das Bild der Sternenbewegungen wird vor dem Hintergrund der Unbeweglichkeit wahrgenommen, die dem ewigen Sein eigen ist und die auch (von Parmenides und Aristoteles) als Sein *außerhalb des Werdens*, als Sein, das *nicht war und sein wird, sondern nur ist*, gefaßt wird. Diese Konzeption ist in über zweitausend Jahren Philosophie grundsätzlich unverändert geblieben.

Obwohl dieser Begriff der Ewigkeit vielleicht die älteste und konstanteste Intuition des menschlichen Denkens ist, hat er, abgesehen von poetisch-metaphysischen Behauptungen, keinen Widerhall im naturwissenschaftlichen Denken gefunden. Es war sicherlich das Attribut »metaphysisch«, das dem Begriff der Ewigkeit anhaftet, das dazu beigetragen hat, den Graben zwischen Naturwissenschaft und poetischer Intuition zu vergrößern und jeden Versuch einer Annäherung zu vereiteln.

Doch heute, in den Theorien, die das Einsteinsche Relativitätsprinzip verallgemeinern, finden sich geometrische Einheiten, die unweigerlich an das parmenideische Konzept der Ewigkeit erinnern und die ich hier kurz illustrieren werde. Ich beginne mit einigen Überlegungen zur fundamentalen Rolle, die der Begriff der Symmetrie in der Physik dieses Jahrhunderts spielt.

2. Die Symmetrien in der Physik: die galileische Relativität, die spezielle Relativität und ihre Verallgemeinerungen

Man kann behaupten, daß ein Großteil der physikalischen Forschung und ihrer Fortschritte, und zwar seit ihrem Beginn, explizit und bewußt jedoch in diesem Jahrhundert, auf der Erforschung, Entdeckung und auf den Konsequenzen neuer Symmetrien der Gesetze basiert, die die Physik bestimmen. Dies läßt sich auch so definieren: *Invarianz der Gesetze bezüglich der Veränderungen der physikalischen Größen, die in ihnen enthalten sind.*

Um die Symmetrie-Eigenschaften eines Gesetzes oder der Gleichungen, die es repräsentieren, zu beschreiben, bedient sich die Physik des mathematischen Instruments der Theorie der Transformationsgruppen.

Man behauptet damit, daß ein Gesetz, oder die entsprechenden Gleichungen, eine Symmetrie aufweisen, wenn das Gesetz bezüglich einer bestimmten Gruppe von Transformationen invariant oder seine Gleichungen kovariant³ sind; so zum Beispiel die Koordinaten von Raum und Zeit oder anderer Größen, die im Gesetz und in den Gleichungen auftauchen.

Es ist leicht zu verstehen, warum die Eigenschaft der Symmetrie der Gesetze für die Physik bedeutsam ist: denn je größer die Symmetrie eines Gesetzes ist, d. h. je invarianter das Gesetz bezüglich der Transformationsgruppen ist, desto ›wahrer‹ im Sinne von ›objektiver‹ ist es, weil es nicht von den besonderen Werten der Größen abhängt, die in ihm enthalten sind und die ja ihrerseits wieder vom besonderen Punkt der Beobachtung und damit vom jeweiligen Betrachter abhängen. Deswegen bedeutet im strikt naturwissenschaftlichen Sinne ›symmetrischer‹ auch ›objektiver‹ und damit ›wahrer‹, insofern damit ein größeres Vermögen angezeigt ist, die einzelnen Phänomene, wie sie in der Natur vorkommen, zu erklären und vorausszusagen. Doch es gibt noch einen anderen Grund, aus dem die Symmetrien der physikalischen Gesetze wichtig sind. Er ist in dem fundamentalen Theorem der deutschen Mathematikerin E. Nöther (1918) ausgesprochen, das beweist, daß jeder Kovarianz der Bewegungsgleichungen eines geschlossenen physikalischen Systems ein Erhaltungsgesetz für eine entsprechende Größe dieses Systems entspricht; d. h.: eine Größe, die konstant bleibt in der Zeit und die man darum leicht beobachten kann.

So folgt aus der Translations-Invarianz der physikalischen Gesetze (was nichts anderes heißt, als daß die Gesetze und die Gleichungen, die sie repräsentieren, z. B. in Venedig dieselben sind wie in Triest) und aus dem Noetherschen Theorem die Erhaltung der Quantität der Bewegung; sie wird auch das galileische Trägheitsprinzip genannt (deswegen man auf der Autobahn, wenn man nicht rechtzeitig bremst, auf den Vordermann auffährt). Analog folgt aus der Rotations-Invarianz der Gesetze (hierzu würde auch nur das Noethersche Theorem genügen) die Erhaltung des Drehimpulses (Winkelmoments – deswegen die sich drehende Erde den Nordpol immer auf den Polarstern gerichtet hat, die Umlaufbahnen der Planeten eben sind und eine Katze durch die Drehungen des Schwanzes immer auf ihren Pfoten landet). Translationen und Rotationen bilden die Euklidische Gruppe, die ihr entsprechende Symmetrie heißt euklidisch. Diese Symmetrie oder Invarianz scheint banal zu sein, ist es aber nicht: sie ist eine Konsequenz aus der Isotropie des leeren Raumes; vor allem sind die Folgerungen aus dieser Symmetrie nicht banal, die, als sie entdeckt wurden, bedeutende Prinzipien zeitigten (aus der Trägheit und der Erhaltung des Drehimpulses: das Keplersche Gesetz). Frau Noether verdanken wir das Wissen, daß es einfache Konsequenzen aus ihrem fundamentalen Theorem, einem Eckpfeiler der modernen Physik, sind, die die Symmetrien mit den Invarianzen in der Zeit verbinden.

Es ist eines der Hauptverdienste Galileis, festgestellt zu haben, daß die Gleichungen der Mechanik kovariant bezüglich der (darum so genannten) Galilei-Transformationen sind (die die Euklidische Gruppe als Untergruppe enthält); diese betreffen den Übergang von den Koordinaten eines ruhenden Bezugssystems zu denen eines geradlinig-gleichförmig bewegten Systems. Diese Bezugssysteme nennt man Inertialsysteme. Die Galileische Relativität behauptet also, daß die Gesetze der Mechanik in zwei verschiedenen Inertialsystemen die gleichen sind, so z. B. in meinem Labor oder in einem Zug, der sich auf geraden Gleisen mit einer konstanten Geschwindigkeit fortbewegt. Daraus folgt, daß die mechanischen Experimente, wie etwa der freie Fall von Körpern oder die Schwingungen einer Feder, die gleichen Resultate ergeben, ob ich sie nun in meinem Labor oder in dem Zug ausführe.

Einstein hat die Galileische Relativität auch auf das Licht erweitert, indem er postulierte, daß die Gesetze des Elektromagnetismus, die

die Ausbreitung des Lichtes und der Radiowellen bestimmen und die in den Maxwellschen Gleichungen formuliert sind, in zwei Inertialsystemen die gleichen sind. Weil in diesen Gleichungen die Lichtgeschwindigkeit eine besondere Stellung einnimmt, bedeutet dies, daß, wenn ich optische Versuche in einem Zug unternehme, sich die Geschwindigkeit des Lichtes nicht mit der des Zuges addiert (oder subtrahiert), weil nämlich andernfalls die für das Labor geltenden Gleichungen von denen, die für den Zug oder ein Flugzeug gelten, verschieden wären und die Maxwellschen Gliederungen somit, obwohl sie eines der wichtigsten Naturphänomene betreffen, sehr wenig ›Objektivität‹ hätten. Das Licht ist nicht nur für uns wichtig, sondern es ist, wie einige jüngere Arbeiten gezeigt haben, auch eines der Phänomene, die am engsten mit den elementaren Naturgesetzen verbunden sind.

Die spezielle Relativität, die die Kovarianz der Maxwellschen Gleichungen für den Wechsel zwischen Inertialsystemen bestimmt, ist also ganz natürlich – gleichsam offensichtlich, wie es auch offensichtlich ist, daß die Gesetze, die die elementaren und universellen Phänomene der Natur regeln, ›objektiv‹ sein müssen: sie müssen dieselben bleiben, ob im Labor, im Zug oder im Flugzeug.

Diese Invarianz der Maxwellschen Gleichungen bezüglich des Wechsels von Inertialsystemen ist der Ausgangspunkt für die spezielle Relativitätstheorie Einsteins. Die Gruppe der Transformationen, die diese Kovarianz der Maxwellschen Gleichungen darstellen, war schon vor Einstein bekannt und wurde Poincaré-Gruppe genannt. Sie ersetzte in den relativistischen Theorien die Galilei-Gruppe bei der Beschreibung der Veränderung von Koordinaten zwischen Inertialsystemen (wenn man in den Poincaré-Transformationen die in ihnen erscheinende Lichtgeschwindigkeit gegen unendlich gehen läßt, erhält man die Galilei-Transformationen).

Die Konsequenzen aus der speziellen Relativitätstheorie sind bekanntlich sehr weitreichend, und sie zeigen uns, wie trügerisch nicht nur die Erkenntnisse der Natur sind, die wir durch den Blick durch das enge Fenster, das unsere Sinne sind, gewinnen, sondern auch die Intuitionen, die auf diesen Erkenntnissen basieren. Es genügt, auf die Unhaltbarkeit des intuitiven Begriffs der Gleichzeitigkeit hinzuweisen. Es war der Erfolg der speziellen Relativitätstheorie, der bewies, wie groß in der Natur die Rolle ist, die die Symmetrien bei der

Bestimmung der Reichweite und der Konsequenzen der Naturgesetze spielen. Man hat sich also sofort daran gemacht, herauszufinden, ob es Symmetrien und Kovarianzgruppen gibt, die die Poincaré-Gruppe der speziellen Relativität als Untergruppe oder Sonderfall umfassen. Dadurch hat sich herausgestellt, daß die spezielle Relativität, die Raum und Zeit als Kontinuum mit vier Dimensionen konzipiert, in dem die euklidische Geometrie gilt, zwei grundsätzliche Verallgemeinerungen aufweist.

Die erste ist die allgemeine Relativitätstheorie, die wir wiederum Einstein verdanken und in der das Raum-Zeit-Kontinuum nicht mehr eben, sondern gekrümmt vorgestellt wird (die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist nicht das Segment einer Geraden, sondern ein Krümmungsbogen: zum Beispiel der Bogen eines Großkreises auf einer kugelförmigen Oberfläche). Die Krümmung der Raum-Zeit-Welt wird von der Masse bestimmt, die in ihr enthalten ist. Da nun in diesem gekrümmten Raum die Zeit von einer gekrümmten Linie und nicht von einer Geraden dargestellt wird, versteht man, daß bei ausreichend großer Masse diese Kurve auch zum Kreis geschlossen sein kann, ein Zirkel, der bedeuten würde, daß »alles wiederkehrt«. Die zirkulare Zeit lädt zu uferlosen Spekulationen ein, die jedoch meistens eher phantastischen als philosophischen Charakter haben, insofern diese Situation sich in der Natur nur in der Nähe gigantischer Massekonzentrationen verifizieren kann (die schwarzen Löcher, die so genannt werden, weil nicht nur die Zeit, sondern auch der Raum zirkulär ist, so daß das Licht nicht austreten kann), wo also das Leben, so wie wir es kennen, nicht vorstellbar ist (und noch weniger die Philosophen); deshalb werde ich diesen immerhin faszinierenden Aspekt der generellen Relativität nicht weiter behandeln.

Die zweite wichtige Verallgemeinerung der speziellen Relativität ist die Theorie der konformen Symmetrie, über die ich nun kurz sprechen möchte.

3. Konsequenzen der konformen Invarianz

Schon 1909 hatten Bateman und Cunningham entdeckt⁵, daß die Maxwellschen Lichtgleichungen eine größere Symmetrie aufwiesen als die der speziellen Relativität, d. h. eine größere Kovarianzgruppe als die von Poincaré bildeten: die Gruppe der konformen Transformationen, die, wie man beweisen kann, die größte in einem ebenen

Raum-Zeit-Kontinuum mögliche Symmetriegruppe ist und die als Untergruppe die Poincaré-Gruppe der speziellen Relativität enthält.

Die wichtigste Neuheit der konformen Gruppe besteht darin, daß sie zu den Transformationen der Poincaré-Gruppe (die den Übergang von einem ruhenden System in ein System geradliniger, gleichförmiger Bewegung beschreiben) auch die »Dilatationen« oder »Veränderungen« des Maßes der Längen (und der Zeiten) in den beiden Systemen hinzufügt. Die Dilatationen, die man erhält, wenn man alle Längen (und Zeiten) mit der gleichen positiven Zahl ρ ($x'_{\mu} = \rho x_{\mu}$) multipliziert, ermöglichen eine Transformation, die man auch Ähnlichkeitstransformation nennt und mit deren Hilfe jede geometrische Figur vergrößert oder verkleinert wird, ohne jedoch den Winkel zwischen den einzelnen Teilen der Figur zu verändern: daher der Name »konforme Gruppe«. Wenn ein System eine konforme Symmetrie aufweist, verlieren die Wörter »groß« und »klein« natürlich jede Bedeutung. Eine weitere Neuheit der konformen Gruppe ist das Auftauchen einer Transformation, die auch »invers konform« genannt wird und mit deren Hilfe man jedem Punkt X_{μ} einen Punkt X_{μ}/x^2 zuordnet. Eine invers konforme Transformation, gefolgt von einer Poincaréschen Translation und einer weiteren invers konformen Transformation ergeben eine spezielle konforme Transformation.

Man kann zeigen, daß die konforme Invarianz strikt nur für masselose physikalische Systeme gilt; die Masse selbst beinhaltet immer eine Länge: entweder einen Krümmungsradius in der allgemeinen Relativität oder die Compton-Wellenlänge in der Quantenmechanik. Das Licht hat keine (Ruhe-)Masse (und muß sich deshalb immer mit Höchstgeschwindigkeit bewegen).

Die Tatsache, daß ein so fundamentales Naturgesetz wie das des Lichtes eine größere Symmetrie als die relativistische aufweist, hat sofort die Phantasie der Physiker beschäftigt und den Verdacht (sowie die Hoffnung) aufgebracht, daß die konforme Invarianz, von der die relativistische ja nur ein Spezialfall ist, auch die Erklärung anderer fundamentaler Naturgesetze begründen könne und so ein tieferes Verständnis des Raum-Zeit-Kontinuums ermöglichen würde.

Während der letzten 75 Jahre sind sowohl von der Empirie (Versuche in den großen Beschleunigern: Skaleninvarianz in den Prozessen mit Elementarteilchen bei hohen Energien) als auch vom Studium der allgemeinen Relativität Hinweise gekommen, die die Hypothese von

der fundamentalen Bedeutung der konformen Invarianzen in der Natur bekräftigen; über dieses Problem sind Hunderte von Arbeiten geschrieben worden.⁶ Bislang jedoch nur mit partiellem Erfolg, weil die konformen Transformationen erhebliche geometrisch-mathematische Schwierigkeiten bereiten. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, daß einige Transformationen der Gruppe, die sogenannten speziell konformen Transformationen, Singularitäten oder ›Divergenzen‹ aufweisen, d. h. sie transformieren Punkte der Raum-Zeit, oder genauer deren Koordinaten, vom Endlichen ins Unendliche.⁷

Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, ist die Hypothese aufgestellt worden, daß die Raum-Zeit sich zusammensetzt aus einer geschlossenen und kompakten Oberfläche, die in einem Raum mit sechs Dimensionen eingelassen ist, davon vier für den Raum und zwei für die Zeit (die sogenannte kompaktifizierte Raum-Zeit); genauer, daß die Raum-Zeit aus einem Kreis besteht (der Zeit) und einer dreidimensionalen kugelförmigen Oberfläche, die beide einen Radius von der Größe des Universums haben.

Diese Hypothese ist ausführlich von dem amerikanischen Mathematiker Segal⁸ und seinen Mitarbeitern studiert worden. Die Hauptgründe, aus dem die Physiker bis heute diese Idee ablehnen, ist die kreisförmige Zeit; denn eine solche Hypothese würde, wenn man sie akzeptierte, unter anderem der (globalen) Kausalität den Todesstoß geben, und auf ihr ist schließlich das ganze Gebäude der Wissenschaft gebaut. Wenn ich die Ursache meines Sohnes bin, kommt mein Sohn zeitlich nach mir; wenn aber die Zeit kreisförmig ist, hat mein Sohn mich, seine Ursache, in seiner Zukunft, wie fern auch immer, und damit ist das Kausalitätsprinzip verletzt.

Der andere Weg, den man beschritt, um den Schwierigkeiten der singulären konformen Transformationen zu begegnen, war der, bei der Arbeit mit den konformen Kovarianzen die Zonen der Raum-Zeit zu vermeiden, in denen die Divergenzen auftreten. Dies ist möglich, und die entsprechende Theorie heißt ›lokal‹. Die konforme lokale Kovarianz ist von vielen Seiten der Physik der masselosen Systeme studiert und erprobt worden.⁹

Aber eine der wichtigsten Entdeckungen der jungen theoretischen Physik ist die der Bedeutung, die die globalen Transformationen auch bei der Bestimmung von lokalen Eigenschaften physikalischer Systeme haben. So folgt aus der Nicht-Invarianz der Gesetze der schwachen

Wechselwirkungen bezüglich von Spiegelungen¹⁰ die Nicht-Erhaltung der Parität bei Fermi-Wechselwirkungen der Radioaktivität (die folglich in der Natur die einzigen sind, die zwischen rechts und links unterscheiden).

Durch das Studium der globalen Eigenschaften der konformen Transformationen ist bewiesen worden¹¹, daß einzig die konforme Invarianz die Möglichkeit der Existenz zweier Typen von Spin-Strukturen vorsieht, die letztlich das Skelett der Elementarteilchen darstellen; die Fermionen (und die Natur scheint uns diese Teilchen in der Tat immer als Paare zu zeigen: Elektron/Neutrino; Myon/Myon-Neutrino; Proton/Neutron etc.).

Es ist also unumgänglich, das Studium dieser globalen Eigenschaften weiter voranzutreiben; wenn wir jedoch das fundamentale Prinzip der Kausalität nicht aufgeben wollen, wenn wir davon ausgehen wollen, daß in Abwesenheit von Masse die Raum-Zeit keine Krümmung aufweist, sondern euklidisch ist, und wenn wir in der Raum-Zeit global mit der konformen Gruppe operieren wollen, dann bleibt uns nichts anderes übrig, als die oben erwähnten Singularitäten der speziell konformen Transformationen mit entsprechenden mathematischen Hilfsmitteln anzugehen und zu versuchen, sie zu verstehen.

Man kann zeigen¹², daß diese speziell konformen Transformationen mit Mitteln der topologischen Geometrie beschreibbar sind und so einen beliebigen Punkt der Raum-Zeit auf einen Punkt abbilden, dessen Koordinaten in Raum und Zeit unendlich sind. Diese Punkte konstituieren ein Ensemble, das nach Penrose ›Lichtkegel im Unendlichen‹ heißt.¹³ Die Punkte dieses Ensembles sind dergestalt, daß gilt: *positive (zukünftige) und negative (vergangene) Zeiten müssen an einem Punkt als strikt äquivalent gedacht werden.*

Die Gesamtheit der Punkte des ›Lichtkegels im Unendlichen‹ gibt, wenn sie der Raum-Zeit hinzugefügt wird, dieser die geometrischen (topologischen) Eigenschaften eines abgeschlossenen Raumes (der nicht einfach zusammenhängend ist¹⁴); man kann infolgedessen behaupten, daß ›der Lichtkegel im Unendlichen die Raum-Zeit abschließt‹. Darüber hinaus ergibt sich, daß in der Einheit von Raum-Zeit und Lichtkegel die konforme Gruppe global und transitiv angewandt werden kann, was nichts anderes heißt, als daß jeder Punkt in jeden anderen Punkt mit Hilfe von Transformationen der konformen Gruppe übertragen werden kann. (Man sagt, daß dieser Raum von der

konformen Gruppe in sich transformiert wird wie eine Kugel, die durch Rotation in sich transformiert wird, während ihr Zentrum fix bleibt.)

Wenn aber auf diesem Lichtkegel Vergangenheit und Zukunft äquivalent sind, bedeutet das, daß in dieser Region der Raum-Zeit die temporale Ordnung nicht definierbar ist und folglich auch nicht die kausale. Oder: Wenn die Gegenwart als Mitte zwischen Vergangenheit und Zukunft definiert wird, dann kann ich auch sagen, daß in dieser Region die Zeit immer gegenwärtig ist, bzw. daß sie ›außerhalb der Zeit‹ ist. Und diese Auffassung ist der des Parmenides von der Ewigkeit sehr ähnlich – und radikal verschieden von der Einsteinschen der Raum-Zeit als ewiger Geometrie, weil in dieser Geometrie die temporale und kausale Ordnung erhalten bleibt. Der Lichtkegel im Unendlichen hingegen ist außerhalb der orientierbaren Raum-Zeit und die zeitliche Ordnung ist nicht einmal bestimmbar.

4. Die divergenten speziell konformen Transformationen

Wir können also schließen:

1. wenn die konforme globale Symmetrie eine fundamentale Symmetrie der Natur ist;
2. wenn wir annehmen, daß die Raum-Zeit in Abwesenheit von Masse eben (ohne Krümmung) ist und dort ausschließlich die euklidische Geometrie mit dem Kausalitätsprinzip gilt, *dann müssen wir der Raum-Zeit eine Region hinzufügen (den ›Lichtkegel im Unendlichen‹), in der die zeitliche Ordnung nicht mehr definierbar ist, die nicht mehr mit endlichen zeitlichen (oder räumlichen) Translationen erreichbar ist und die man darum ›außerhalb der Zeit (und des Raumes)‹ nennen kann;*

weiterhin gibt es Transformationen der konformen Gruppe, die die Punkte der normalen Raum-Zeit in diese Region außerhalb der Zeit transformieren – und umgekehrt die Punkte dieser Region außerhalb der Zeit in Punkte der normalen Raum-Zeit.

Die Kausalität gilt natürlich nur in der normalen Raum-Zeit und nicht auf dem Lichtkegel, zu dem die speziell konformen Transformationen führen. Dies ist insofern kein Widerspruch, als die normale Raum-Zeit, in der die Kausalität gilt, unendlich ist und jede Poincaré-Translation, wie groß auch immer, nicht aus der normalen Raum-Zeit führt; jedes physikalische System braucht aber unendliche Zeit (und

Lichtgeschwindigkeiten), um auf den Lichtkegel zu gelangen. Dieser kann also verstanden werden als außerhalb der normalen Raum-Zeit in einem Abstand, der in Raum und Zeit unendlich ist.

Ich werde nun mit einfachen Analogien zu erklären versuchen, wie die Theorie der konformen Kovarianz zu diesen Behauptungen gelangt. Wir hatten gesagt, daß man sich die konformen Transformationen auch als Transformationen von orthogonalen Koordinaten in einem sechsdimensionalen Raum vorstellen kann; die Raum-Zeit kann man sich als Kreis und als Kugel in diesem Raum denken. Um von diesem gekrümmten Raum zu dem ebenen zu gelangen, in dem sich Phänomene der Physik abspielen und in dem wir leben, kann man sich der Methode der stereographischen Projektion bedienen, die ich hier der Einfachheit halber nur in einer Dimension vorführen will.

Wir stellen uns einen Kreis C vor, der von der Geraden T in seinem Mittelpunkt O geschnitten wird. T sei unsere Raum-Zeit (oder auch nur die Zeit). Wir ziehen nun eine Senkrechte auf T durch O und nennen N einen der Punkte, an denen sie den Kreis schneidet. Von N projizieren wir die Punkte P auf der Kreislinie auf die Punkte t der Geraden; dazu reicht eine Gerade, die, von N ausgehend, die Kreislinie in P und die Gerade in t schneidet. Je mehr nun sich P an N annähert, desto mehr tendiert t ins negativ oder positiv Unendliche, je nachdem ob sich P auf dem rechten (P) oder linken (P') Halbkreis befindet. Auf diese Weise können wir den gesamten Kreisumfang C auf der unendlichen Geraden T abbilden.

Halt: den gesamten Kreisumfang außer dem Punkt N , dem auf der Geraden der Punkt entspricht, an dem die Gerade T ihre Parallele durch N trifft, also sowohl $+\infty$ als auch $-\infty$. Um also den gesamten Kreisumfang C abzubilden, brauchen wir die gesamte unendliche Gerade T und müssen ihr noch den Grenzwert $t \rightarrow +\infty$, der dem Grenzwert $t \rightarrow -\infty$ äquivalent ist, hinzufügen; also den ›Punkt‹ $\{+\infty, -\infty\}$ (auch ›uneigentlicher Punkt‹ genannt) der Geraden, der als einziger dem Punkt N auf der Kreislinie entspricht.

Daraus ergibt sich: die gerichtete und unendliche Gerade T entspricht dem Kreisumfang C außer im Punkt N ; der Punkt N entspricht dem uneigentlichen Punkt der Geraden, an dem eine zeitliche Orientierung nicht mehr möglich ist. Versuchen wir nun, einige Rotationen auf der Kreislinie auszuführen, z. B.: der Rotation, die P'' nach P bringt, entspricht die Translation, die auf der Geraden $+t''$ nach $+t$ bringt.

Das heißt, daß den Rotationen auf der Kreislinie Translationen auf der Geraden T entsprechen, und umgekehrt. Wenn ich mich jedoch auf die Gerade T beschränke, auf der ich alle möglichen Translationen ausführen kann, dann entsprechen diesen Translationen nicht alle möglichen Rotationen auf der Kreislinie C, weil ich den Punkt N ausgeschlossen habe. Für *alle* Rotationen muß ich auch den Punkt N einschließen und folglich der Geraden T den uneigentlichen Punkt $\{+ \infty, - \infty\}$ hinzufügen, den man sich außerhalb von T (und außerhalb der Zeit) denken kann, da er von keiner noch so großen Anzahl endlicher zeitlicher Translationen erreicht werden kann; darüber hinaus ist in ihm eine zeitliche Orientierung nicht mehr möglich. Wir haben also gesehen, daß der Punkt $\{+ \infty, - \infty\}$ *notwendig* ist, um die globalen Transformationen (Rotationen) darstellen zu können; er ist notwendig in der Physik, wenn die globalen Transformationen tatsächlich am Ursprung der Phänomene liegen, die wir in der Natur beobachten. Wir können also über diesen Punkt $\{+ \infty, - \infty\}$, der mit N korrespondiert, sagen: den Rotationen, die auf C von P nach N führen, entsprechen auf der Geraden T Translationen, die von t nach $\{+ \infty, - \infty\}$ führen, und diese *müssen* divergent oder vielmehr unendlich sein.¹⁵

Wären wir nun von dem Kreis und der Kugel des sechsdimensionalen Raumes ausgegangen, dann hätte sich ergeben, daß, um ihn vollständig darzustellen, sowohl die normale, unendliche, ebene Raum-Zeit, in der man sich in der Zeit orientieren kann, notwendig ist, als auch der Lichtkegel im Unendlichen, der zeitlich ungerichtet oder ›außerhalb der Zeit‹ ist und wohin eben die divergenten, speziell konformen Transformationen die Punkte der Raum-Zeit tragen. Die Gruppe der konformen Transformationen enthält also, neben den Transformationen der Poincaré-Gruppe, die den Übergang eines ruhenden Systems in gleichförmig-geradlinige Bewegung beschreiben, auch Transformationen, die in unendlichen Abstand, sozusagen ›außerhalb der Zeit‹ führen. Wie können wir uns diese Transformationen vorstellen?

Die Transformationen zwischen ruhenden Bezugssystemen und solchen in (inertialer) Bewegung, wie sie die Galileische und die Einsteinsche Relativität beschreiben, sind einfach vorstellbar und auch realisierbar (denn es ist einfach, sich in einen Zug zu setzen). Aber wie kann man die Transformationen der konformen Gruppe, die ›außerhalb der Zeit‹ führen, realisieren?

Um dies zu verstehen, kehren wir zur speziellen Relativitätstheorie zurück und erinnern uns, daß, wenn ein Mensch in einem Raumschiff, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, ein Zeitintervall τ mißt, wir auf der Erde das Zeitintervall t gemäß folgender Formel messen würden¹⁶:

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Stellen wir uns für einen Moment vor, wir könnten das Raumschiff auf Lichtgeschwindigkeit bringen: in diesem Fall wird

$$1 - \frac{v^2}{c^2}$$

zu $1 - 1 = 0$ und folglich wird t unendlich, auch wenn τ unendlich klein ist. Wenn dann das Zeitintervall τ auch den gegenwärtigen Augenblick mitenthielte, für den gilt $\tau = 0$ und der damit also dem Intervall (auf dem Raumschiff) entspräche, für das gilt

$$\tau \equiv \left(-\frac{\tau}{2} + \frac{\tau}{2} \right)$$

dann wäre das entsprechende, von uns auf der Erde wahrgenommene Intervall $t = \{ -\infty, +\infty \}$.

Man kann somit beweisen, daß t tatsächlich auf den Lichtkegel im Unendlichen, von dem wir vorhin sprachen, gelangen wird, wenn τ unendlich klein wird. Wenn ich nun eine Poincaré-Translation anwende, ergibt sich, daß jedes noch so kleine Intervall der Raum-Zeit auf diese Weise auf den Lichtkegel gebracht werden kann, d. h. außerhalb der Zeit. Man kann sich also den Lichtkegel im Unendlichen vorstellen als ein beliebiges Intervall infinitesimaler Zeit (jedoch nicht gleich null) in einem Bezugssystem, das sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Doch wir wissen ja, daß unsere Hypothese, ein Raumschiff auf Lichtgeschwindigkeit zu bringen, trügerisch ist, da dies nur für

masselose Systeme möglich ist. Unsere Transformation auf den Lichtkegel oder ›außerhalb der Zeit‹ wäre also nur möglich, wenn wir unserem Raumschiff und seiner Besatzung jegliche Masse entzögen. Wir können folglich sagen, daß man unsere speziell konformen Transformationen nach ›außerhalb der Zeit‹ auch als gewöhnliche Transformationen der Poincaré-Gruppe (zwischen inertialen Bezugssystemen) denken kann, wenn man den physikalischen Systemen, die sich in besagten Bezugssystemen bewegen, alle Masse entziehen könnte.

Es ist hingegen einleuchtend, daß für physikalische Systeme, die konforme Symmetrien aufweisen – und das können nur Systeme ohne Masse sein –, diese Transformationen auf den Lichtkegel, d. h. außerhalb der Zeit, legitim und zulässig sind.

Doch auch das Umgekehrte ist möglich. Es gibt Transformationen der konformen Gruppe, die vom Lichtkegel auf einen beliebigen Punkt der Raum-Zeit zurückführen. Man kann sie als Poincaré-Transformationen von Systemen ohne Masse mit konformer Symmetrie denken, die sich auf dem Lichtkegel, also außerhalb von Raum und Zeit befinden. Sie gewinnen Masse und werden so notwendigerweise in eine Region der normalen Raum-Zeit projiziert, wo sie der Kausalität und folglich der zeitlichen Ordnung unterliegen.

Diese Ausführungen sind eine getreue Übersetzung dessen, was in den mathematisch-geometrischen Gleichungen der Theorien der konformen globalen Symmetrie ausgedrückt ist. Doch zweifellos rufen sie in uns die Erinnerung an Intuitionen der antiken Mythologie und Philosophie wach. Die Physik ist bis hierher gelangt, oder, um die Wahrheit zu gestehen, sie ist hier noch nicht ganz angekommen. Wir wissen noch nicht mit absoluter Sicherheit, ob, abgesehen von den Maxwellschen Gleichungen, die konforme globale Kovarianz eine fundamentale Symmetrie der Natur ist. Wir vermuten es sehr stark, aber es ist noch ein langer Weg, nicht nur, um es schlüssig zu beweisen, sondern auch, um zu überschauen, welche physikalischen Konsequenzen diese Symmetrie, die größer ist als die der Relativitätstheorie, zeitigt; zweifelsohne werden sie sehr wichtig sein.

Ich habe versucht aufzuzeigen, daß eine der ältesten Spekulationen des menschlichen Denkens über den Begriff der Zeit, der Parmenideische Ewigkeitsbegriff, der einzige, den das wissenschaftliche Den-

ken nicht aufgegriffen hat, vermutlich einige faszinierende Beziehungen mit den mysteriösen Eigenschaften der konformen Gruppe unterhält. Könnten wir beweisen, daß die konforme Symmetrie, über die Gesetze der elektromagnetischen Strahlung und also die des Lichtes hinaus, fundamental für andere Gesetze der Natur ist, dann hätten wir einen weiteren Schritt in Richtung auf das Verständnis des Ursprungs antiker philosophischer Intuition getan. Wir würden so verschiedene Modi der Wirklichkeitserforschung, die gänzlich voneinander getrennt zu sein schienen, wieder zusammenbringen; damit wären diejenigen ermuntert, die an die tiefe Einheit von Meditation und Imagination glauben.

Anmerkungen

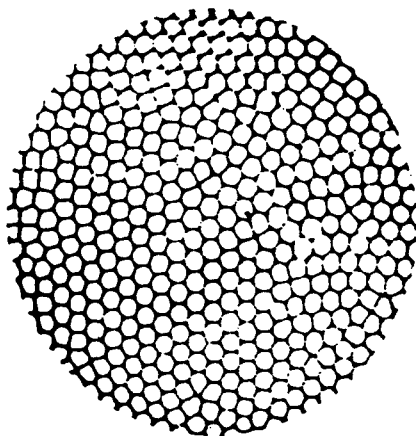
Dank sei Herrn Claus-Christian Glüer (Hamburg), der das Manuskript durchgesehen hat.

- 1 Ich möchte Prof. Livio Pesante für die klärende Beratung bei der Abfassung der historischen Einleitung danken.
- 2 Dies mag erklären, warum die heliozentrische Theorie, die Aristarch von Samos wohlbekannt war und die es ihm ermöglicht hatte, die Planetenentfernungen zu messen, erst 2000 Jahre später wieder zum Leben erweckt wurde.
- 3 Gleichungen sind Gleichheiten: $A = B$; unter Kovarianz versteht man: A und B variieren »auf die gleiche Weise«; so daß, wenn nach der Variation aus A und B jeweils A' und B' geworden ist, aus $A = B$ folgt: $A' = B'$.
- 4 A. Trautman, Deformation of the Hedge map an optical geometry, *Geometry and Physics* (im Druck).
- 5 E. Cunningham, The principle of relativity in electrodynamics and an extension thereof, *Proc. London Math. Soc.* 8, S. 77 (1909). H. Bateman, The transformation of the electrodynamical equations, *Proc. London Math. Soc.* 8, S. 223 (1909).
- 6 L. T. Todorov, M. C. Mintchev, V. B. Petkova, Conformal invariance in quantum field theory, *Pubblicazione della Scuola Normale Superiore di Pisa* (1978).
- 7 Es ist eine Angewohnheit der Natur, uns unser mangelndes Verständnis ihrer Gesetze durch »Divergenzen« anzuzeigen; sie sind auch der Quantenelektrodynamik und der Gravitation bekannt, letztere immer noch gänzlich unverstanden und ungelöst.
- 8 I. E. Segal, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 73, S. 335 (1976).
- 9 L. T. Todorov et al., a. a. O.

- 10 Sie bestehen z. B. in der Richtungsänderung einer der Bezugsachsen; dies ist global, insofern die Richtung auf der ganzen Achse von minus unendlich bis plus unendlich geändert wird. Diese Transformation entspricht einer Spiegelung, die ›rechts‹ in ›links‹ verwandelt.
- 11 P. Budinich, *Groups, Fields and Particles*, Dordrecht 1983. L. Dabrowski, *Nuovo Cimento A* 80, S. 177 (1984).
- 12 P. Budinich, L. Dabrowski, im Druck.
- 13 R. Penrose, *Structure of space-time*, Bottelle Rencontres 1967, New York (Benjamin) 1968.
- 14 L. T. Todorov et. al., a. a. O.
- 15 Interessanterweise entspricht einer Rotation auf C von P nach P' durch N auf der Geraden T die Abfolge zweier Translationen: eine von t nach $\{+\infty, -\infty\}$ oder ›außerhalb der Zeit‹, gefolgt von einer ›außerhalb der Zeit‹ nach $-\tau$.
- 16 Diese Gleichung, auch als relativistische Zeitdilatation bezeichnet, ist wohlbekannt und sowohl für kosmische Strahlung als auch im Laboratorium experimentell verifiziert worden.

Sind synergetische Systeme unsterblich?

Die Synergetik, ein noch relativ junger Wissenschaftszweig, befaßt sich mit der Frage, ob es Prinzipien gibt, auf Grund deren dynamische Strukturen entstehen können. Zu solchen Strukturen gehören natürlich alle Systeme der lebenden Natur. Aber, wie die Synergetik zutage gefördert hat, es finden sich schon eine Reihe interessanter Strukturbildungen im Anorganischen – Strukturbildungen, die gewisse Züge mit den Eigenschaften des Lebens gemein haben. Die Gemeinsamkeit besteht vor allem darin, daß durch eine ständige Energie- und Stoffzufuhr von außen Strukturen geschaffen und aufrechterhalten werden, wobei sehr viele Elemente zusammenwirken müssen, um makroskopisch bestimmte Funktionen auszuführen. Elementare Beispiele für solche Strukturen aus der anorganischen Welt sind regelmäßig angeordnete Wolkenstraßen. Damit verwandt sind bienenwabentartige oder rollenförmige Muster, die sich in Flüssigkeiten ausbilden, wenn diese Flüssigkeiten von unten erhitzt werden. Ein weiteres,



Eine von unten erhitzte Flüssigkeit setzt sich in Bewegung, wobei sich ein Bienenwabenmuster bildet (Aufsicht).

inzwischen berühmtes Beispiel sind chemische Reaktionen, bei denen etwa spiralförmige Wellen spontan entstehen und sich ausbreiten.

Ein für die Synergetik wichtiges Paradigma ist der Laser, eine neue Lichtquelle. Die einzelnen, in ihm angeregten Atome wirken wie mikroskopische Antennen, die immer wieder nach jeder Anregung durch einen Energiestoß Lichtwellen in Analogie zu Radiowellen aussenden können.

Im Laser tritt nun ein interessantes Phänomen ein. Diese einzelnen Lichtwellenzüge können unter bestimmten Bedingungen der Energiezufuhr zu einem in sich zusammenhängenden, deshalb auch kohärent genannten, unendlich lang »lebenden« Wellenzug zusammenwachsen. Solange wir also dem Laser von außen her Energie zur Anregung der Atome zuführen, bleibt dieser Zustand ewig erhalten.

Allerdings brauchen wir im Normalfall zur Konstruktion des Lasers zwei Spiegel, zwischen denen das Laserlicht immer wieder reflektiert wird und so mit den Atomen in eine Wechselbeziehung treten kann. Natürlich können Spiegel altern. Sorgen wir aber dafür, daß diese immer rechtzeitig ausgewechselt werden, so stellen die Laseratome und das von ihnen erzeugte kohärente Licht einen nie endenden Vorgang dar.

Es gibt auch komplizierte Laserprozesse, in denen etwa verschiedene Wellen gleichzeitig existieren oder es periodische Übergänge von einem Strahlungszustand in einen anderen gibt. Die Fähigkeit des Lasers, durch Selbstorganisation aus dem mikroskopischen Chaos in einen makroskopisch geordneten Zustand überzugehen, nämlich von den mikroskopischen chaotischen Lichtwellen zu der makroskopischen kohärenten Lichtwelle, fasziniert die Synergetik besonders.

Denn dies ist ein Vorgang, der typisch für viele Lebensvorgänge ist. Bei diesen tritt ja ein ungemein hoher Grad an Koordination auf, etwa wenn wir an die Fortbewegung oder die Bewegung von Händen denken. Aber auch wenn wir an geistige Leistungen denken, bei denen eine unvorstellbar große Zahl elektrochemischer Prozesse ablaufen muß, um Gedanken und schließlich Sätze zu bilden.

Warum bringt es nun der Laser fertig, ewig zu leben, während dies biologische Systeme trotz ihrer ständigen Nahrungsaufnahme nicht zu tun vermögen? Das für den Laser Gesagte gilt ebenso für viele andere Prozesse aus der unbelebten Natur, etwa die Bildung der schon oben

genannten Flüssigkeitsmuster. Was haben alle diese Systeme aus der unbelebten Natur denen der belebten Natur voraus, um ihre Funktion unendlich lange aufrechterhalten zu können?

Untersuchen wir zunächst Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den genannten Systemen der unbelebten Natur und denen des Lebens. In beiden Fällen wird die Funktion durch Energieaufnahme und -abgabe, bei chemischen Prozessen auch durch eine Stoffaufnahme und -abgabe, aufrechterhalten. Wird die Zufuhr abgeschaltet, so sterben die Funktionen in beiden Fällen aus; wobei die Zeitskalen verschieden sein mögen, auf jeden Fall wird die Funktion beendet.

Nehmen wir aber beim Laser die Energiezufuhr wieder auf, so kann er auch seinen alten Zustand wieder erreichen. Ein Lebewesen, das tot ist, kann nicht wieder aufgeweckt werden.

Interessanterweise finden in beiden Systemen Dissipationsvorgänge statt, d. h. vorhandene hochwertige Energie wird zumindest zum Teil in niederwertige Wärmeenergie umgewandelt. Der grundlegende Unterschied zwischen beiden Systemarten kann also auch nicht in dieser Art von Dissipation liegen. Beide Systemarten sind jeweils in gewissen, zumeist engen Grenzen anpassungsfähig. Auch die Farbe des ausgestrahlten Laserlichts kann sich, in gewissem Umfang wenigstens, äußeren Gegebenheiten, die durch die Spiegelabstände vorgeschrieben werden, anpassen. Aber – und nun kommt wohl der entscheidende Unterschied – ein Laser kann nicht lernen. Weder die in ihm vorgehenden Prozesse noch seine Wechselwirkung mit seiner Umgebung werden in irgendeiner Art von Information in ihm gespeichert. Schalten wir ihn ab und betreiben wir ihn neu, so erinnert er sich an nichts mehr, das früher war.

Genauso ist es auch bei Flüssigkeiten mit den oben beschriebenen Musterbildungen und vielen anderen in der Synergetik beschriebenen anorganischen Systemen.

Des weiteren sind alle Vorgänge im Laser und den entsprechenden Systemen letztlich reversibel; zum Beispiel kann ein Atom, das eine Welle ausgesandt hat, aufs neue angeregt werden und wieder eine neue Welle aussenden. Es kommt also hier *nicht* zu einer irreparablen oder nicht umkehrbaren Bildung fester Komponenten. Anders bei Lebewesen, bei denen feste Komponenten in mannigfacher Weise und auf meist irreversible Weise gebildet werden. Hierzu gehören insbesonde-

re auch Lernvorgänge, die zunächst für das Überleben der einzelnen Lebewesen unentbehrlich sind, dann aber schließlich zu einer Verhärtung des Anpassungssystems führen, wobei sich im Laufe der Zeit auch nicht dynamisch zu reparierende Fehler einschleichen können und akkumulieren. Die Abwesenheit dieser Merkmale verhilft den synergetischen Systemen der anorganischen Welt zu einer potentiell unendlichen Lebensdauer, während bei den synergetischen Systemen der belebten Natur offenbar ein anderer Kompromiß angestrebt wird. Damit Systeme lebensfähig sind, müssen sie feste Komponenten, insbesondere auch bezüglich des Gedächtnisses, entwickeln. Andererseits können hier irreparable Fehler im Laufe der Zeit sich anhäufen und damit das einzelne Lebewesen lebensunfähig machen.

Die Natur hat hier auf einer höheren Ebene durch den Mechanismus der Vererbung die Informationsweitergabe durch die Gene auf relativ kleine, aber weitgehend gut abgesicherte Einheiten zurückgeführt. Aber auch hier schient es, als würden die Prozesse, die sich aus dem Wechselspiel zwischen Mutation und Selektion in einer sich ständig verändernden Umwelt ergeben, zu in der Regel nicht umkehrbaren Vorgängen führen. Die Frage, ob es auf dieser höheren Ebene dann eine prinzipielle Möglichkeit oder Unmöglichkeit des ewigen Fortbestehens des Lebens gibt, sofern die Energie- und Rohstoffquellen ausreichend sind, läßt sich nicht beantworten, während man im Falle physikalischer oder synergetischer Systeme sagen kann, daß diese Vorgänge ständig aufrechterhalten werden können.

Es ergibt sich natürlich die interessante Frage, ob man, von der Informationstheorie herkommend, sich z. B. laserartige Gebilde vorstellen könnte, die im gleichen Sinn wie etwa ein Lebewesen Information verarbeiten und in diesem Sinn sogar gewisse Lebensvorgänge imitieren könnten; ob z. B. in einem solchen Denkmodell ein anderer Kompromiß bezüglich der Realisierung lebensähnlicher Vorgänge erzielt werden kann. In der Tat gibt es heute schon Laser, die elementare logische Funktionen ausführen und sich sicher zu einem logischen Netz verbinden lassen, das auf Signale aus der Umwelt etwa in spezifischer Weise reagiert. Auch ein Gedächtnis läßt sich einbauen – das verfällt nach einiger Zeit allerdings wieder. Dem Lernen, dem Kenntniserwerb, einem wichtigen Merkmal des Lebens und seiner Evolution, sind hier Grenzen gesetzt, die von anderer Natur sind als diejenigen beim Leben.

Zu berücksichtigen ist weiterhin die begrenzte Zeit der Funktionsfähigkeit fester Komponenten, besonders der Spiegel des Lasers, die man natürlich von Zeit zu Zeit austauschen kann: Dies erscheint mir aber etwas grundsätzlich anderes zu sein als etwa ein Austausch von »Gedächtnismolekülen« in Lebewesen. Überdies kann man sich auch Laser ohne feste Spiegel denken, so daß dies kein grundsätzlicher Einwand gegen eine nichtendende Lebensdauer von Lasern wäre.

Vielleicht erscheinen dem einen oder anderen meine Gedanken zu spekulativ, aber ich glaube, daß es sich lohnt, die vielfältigen Facetten synergetischer Systeme von den verschiedensten Richtungen aus zu beleuchten. Vielleicht stehen auf der einen Seite die Viren, jene tote Kristalle bildenden Riesenmoleküle, die uns vornehmlich in ihrer »festen« Struktur erscheinen, die ihnen aber in der »richtigen« Umgebung zu ihrer Funktion verhilft, während auf der anderen Seite im Laser fast nur noch Funktion und fast keine feste Struktur vorhanden ist. So hoffe ich, daß man auch das Leben selbst und die Frage nach seinen Realisierungsformen, seinen Möglichkeiten und Begrenzungen in einer neuen Perspektive sieht. Natürlich sind diese Ausführungen viel zu kurz, um ein abgerundetes Bild zu vermitteln, aber ich hoffe doch, vielleicht Denkanstöße über das Leben und seine Beziehung zur Zeit gegeben zu haben.

Anmerkung

Für diejenigen Leser, die sich mit der Problematik der Synergetik vertraut machen möchten, sei auf mein allgemeinverständliches Buch *Erfolgsg Geheimnisse der Natur* (DVA Stuttgart, 4. Aufl. 1986) verwiesen.

