

Irreversibilität und Zeitrichtung

Von P. JORDAN *

(Z. Naturforschg. 19 a, 519—523 [1964]; eingegangen am 14. November 1963)

Herrn Professor Dr. E. JUSTI zum 60. Geburtstag gewidmet

Der Verfasser hat vor längerer Zeit die Vermutung ausgesprochen, daß die im zweiten Hauptsatz ausgedrückte Einseitigkeit der Zeitrichtung mit der kosmologischen Expansion zusammenhängen dürfte. Verspätet sind ihm Arbeiten verschiedener Verfasser bekannt geworden, die dieser Vermutung eine Rechtfertigung zu geben scheinen. Ohne den scharfsinnigen mathematischen Formulierungen der fraglichen Verfasser Neues hinzuzufügen, erstrebt die vorliegende Abhandlung einen Beitrag zur Klärung der grundsätzlichen Seite der diesbezüglichen Fragen.

I.

BOLTZMANN hat mit seiner Aufstellung des *H*-Theorems jene grundsätzliche Schwierigkeit der kinetischen Wärmetheorie zu beseitigen unternommen, welche sich daraus ergibt, daß die reine Mechanik — auf welche die kinetische Wärmetheorie die Thermodynamik zurückzuführen sucht — in ihren Grundgesetzen keine ausgezeichnete Zeitrichtung kennt, sondern gegen die Ersetzung von *t* durch $-t$ *invariant* ist. Sein großer Erfolg, für die Entropie einer adiabatisch abgeschlossenen Gasmasse aus kinetischen Voraussetzungen heraus die Unmöglichkeit einer Abnahme bewiesen zu haben, schien für lange Zeit eine abschließende Klärung der Sachlage zu bedeuten. Erst neuerdings haben scharfsinnige Untersuchungen mehrerer Verfasser Zusammenhänge der Irreversibilität mit der Expansion des Kosmos aufgedeckt; und die diesbezüglichen Überlegungen lassen uns nachträglich auch die alten Gedanken BOLTZMANNs in verschärfter Beleuchtung sehen. Es ist also sowohl möglich als auch wichtig geworden, den BOLTZMANNschen Beitrag zur Klärung der Irreversibilität kritisch zu prüfen mit einer Genauigkeit, die man früher wohl als allzu pedantisch angesehen hätte — die aber jetzt vielleicht dazu mit- helfen kann, eine anscheinend sehr fruchtbare und tiefdringende Untersuchungsrichtung weiter zu fördern.

BOLTZMANN ist ja bei der Herleitung seines *H*-Theorems vom *Stoßzahlansatz* der Gastheorie ausgegangen: Dieser *Stoßzahlansatz* führt zu der Folgerung

$$dH/dt \leq 0. \quad (1)$$

Diese Folgerung, welche (wie es erstrebt wurde) tatsächlich die positive Zeitrichtung von der negativen Zeitrichtung unterscheidet, muß also Voraussetzungen benutzen, welche *nicht* aus den Grundgleichungen der Mechanik stammen, sondern etwas Neues, in der Mechanik nicht Enthaltenes hinzufügen.

Es ist vielfach (auch vom Verfasser dieser Zeilen) gesagt worden, daß die *Zunahme statistischer Unordnung in positiver Zeitrichtung* etwas von der Mechanik aus Verständliches sei: Das Schütteln eines Gefäßes, in welchem rote und weiße Sandkörner zunächst ungemischt zusammenliegen, wird ja im Laufe der Zeit zu einer statistischen Durchmischung führen. Bei kritischer Betrachtung wird man aber sagen müssen, daß das Gesetz der Zunahme statistischer Unordnung bei Mischungs- oder Schüttelexperimenten ein zu den Gesetzen der Mechanik *zusätzlich* hinzukommendes ist. Es steht zwar nicht im Widerspruch zur Mechanik, aber es verlangt, daß nur eine engere Auswahl der mathematisch möglichen Lösungen eines Systems von Bewegungsgleichungen wirklich in der Natur oder im Experiment vorkommt.

Das Auffällige ist dabei, daß diese zusätzliche Gesetzmäßigkeit keineswegs nur in der Mikrophysik gültig ist, sondern schon in Fällen, die durchaus zur Makrophysik gehören — so in einem mit Sandkörnern gefüllten Gefäß, aber auch bei einer hinreichend großen Zahl von Apothekerpillen¹.

Bei *kleiner* Zahl der Pillen ist freilich in endlicher, übersehbarer Zeit durch Schütteln des Gefäßes ein Zustand zu erreichen, welcher als grobes Modell

* Hamburg 13, Isestr. 123.

¹ An m. b. d. Korr.: Nachträglich neige ich dazu, zu glauben, daß solche Schüttelexperimente *grundsätzlich* nicht ohne Mitberücksichtigung der *Reibung* beurteilt werden dürfen.

einer Gasmasse im Zustand thermodynamischen Gleichgewichts gelten kann: Die ständig wechselnden Lagen der Kugeln verwirklichen — im Sinne des Ergodensatzes — im Laufe der Zeit alle überhaupt zugelassenen Möglichkeiten, darunter auch die ganz seltenen, ganz auffälligen Beispiele mit vollständiger Sonderung der weißen von den roten Kugeln.

Hier ist die im *H*-Theorem behauptete Verschiedenheit von positiver und negativer Zeitrichtung ausdrücklich aufgehoben: Aus Zuständen großer Entropie gehen gelegentlich solche geringer Entropie hervor, und diese Schwankungen zeichnen in keiner Weise mehr die eine Zeitrichtung vor der anderen aus. SCHRÖDINGER hat vor langer Zeit einmal sorgfältig analysiert, welche dem *H*-Theorem ähnliche, aus der Mechanik zu schöpfende Folgerung auch im Falle des „ergodischen“ Verhaltens übrig bleibt. Nach SCHRÖDINGER kann behauptet werden: Ist das fragliche mechanische System von vielen Freiheitsgraden zur Zeit t_0 in einem Zustand hohen Ordnungsgrades, also geringer Entropie, so ist mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten, daß für nahe benachbarte Zeitwerte t' die Entropie des Systems größer ist; und zwar gilt dies ausdrücklich in symmetrischer Weise sowohl für $t' > t_0$ als auch für $t' < t_0$.

Es muß aber beachtet werden, daß diese von SCHRÖDINGER erörterte Folgerung der statistischen Mechanik wirklich nur für thermodynamische Systeme (oder Modelle) im Gleichgewicht gilt, hingegen für die erdrückende Mehrzahl aller Naturvorgänge unbestreitbar falsch ist. Es sei ein Gefäß durch eine Wand in zwei Teile geteilt, und im einen Teil befinde sich Gas im thermodynamischen Gleichgewicht, im anderen Vakuum. Zur Zeit t_1 werde die Wand plötzlich entfernt. Der jetzt beginnende Vorgang irreversibler Expansion verläuft mit erdrückend großer Wahrscheinlichkeit nach dem Schema der BOLTZMANNschen, auf den Stoßzahlansatz gegründeten Theorie irreversibler Vorgänge. Ist also t_2 eine spätere Zeit: $t_2 > t_1$, wobei aber zur Zeit t_2 die irreversible Expansion und die mit ihr verbundenen Vorgänge von Schwingungen, Turbulenz, Wärmeleitung usw. noch nicht in der allmählichen Beruhigung zum neuen thermodynamischen Gleichgewicht untergegangen sind, so haben wir in der Nähe von t_2 für spätere Zeiten tatsächlich größere Entropie, aber für frühere Zeiten eben kleinere. Dieser Widerspruch gegen SCHRÖDINGERS Umformulierung des *H*-Theorems bedeutet natürlich nicht, daß

die Überlegungen SCHRÖDINGERS einen Fehler enthalten. Sondern er zeigt an, daß die in SCHRÖDINGERS Betrachtung vorausgesetzte Mannigfaltigkeit der verschiedenen in der Statistik mitzuzählenden Vorgangsmöglichkeiten eine andere ist, als die in der Natur fast ausschließlich, d. h. abgesehen von den Gleichgewichtszuständen und ihren Schwankungserscheinungen, tatsächlich vorkommende.

Extreme Entropie-Verkleinerungen durch Schwankungen haben zwar theoretisch stets ebenfalls eine von Null verschiedene Wahrscheinlichkeit. Jedoch wird diese, sobald wir wirklich etwas extreme Fälle betrachten, bald so klein, daß die Wahrscheinlichkeit des Gegenteils relativ dazu Größenordnungen wie etwa $10^{(10^{10})}$ bekommt, so daß die fraglichen Ereignisse nicht nur innerhalb aller Geschichte der Naturforschung, sondern auch innerhalb kosmologischer Zeitmaße keinerlei Aussicht auf kontrollierbare Verwirklichung haben. Sondern bis auf diejenigen Schwankungserscheinungen, die in bekannter Weise auf Vorgängen von einer noch merklichen Wahrscheinlichkeit beruhen, bewährt sich das Prinzip der zunehmenden Ungeordnetheit — nach BOLTZMANN Grundlage der Irreversibilität — vollständig; daß dieses Prinzip weder eine Selbstverständlichkeit noch eine Folge der Mechanik und des Ergodensatzes ist, muß als unausweichlich anerkannt werden.

Es ist vor geraumer Zeit von v. WEIZSÄCKER eindrucksvoll erläutert worden, wie entscheidend die Irreversibilität dazu beiträgt, unsere Welt zu dem zu machen, was sie ist — aber weder auf Grund irgendeiner apriorischen Notwendigkeit, noch auf Grund sonstiger physikalischer Gesetze ist. Die tiefgehende Verschiedenheit von Vergangenheit und Zukunft — durch v. WEIZSÄCKER treffend zum Ausdruck gebracht in dem Begriff „Faktizität der Vergangenheit“ — wäre nicht gegeben ohne die Irreversibilität, welche es möglich macht, daß Ereignisse der Vergangenheit Spuren hinterlassen — während Ereignisse der Zukunft zwar, soweit es sich um Makrophysik handelt, durch die Verhältnisse der Gegenwart determiniert sind, aber keineswegs etwas Analoges, wie die Spuren der Vergangenheit, in der Gegenwart bedingen.

Die „Faktizität“ der Vergangenheit hat einen theologischen Denker früherer Jahrhunderte, DUNS SCORUS, veranlaßt, zu erklären, Gottes Allmacht sei begrenzt derart, daß auch er nicht imstande sei, Vergangenheit ungeschehen zu machen. Andererseits ist die Möglichkeit historischer Wissenschaften, die aus

heute vorhandenen Spuren Vergangenheit rekonstruieren, eine Folge des zweiten Hauptsatzes, wie v. WEIZSÄCKER überzeugend ausgeführt hat. Finden wir beispielsweise ein beschriebenes Pergament oder eine Einritzung schriftähnlicher Zeichen in einem Stein, so verlangt das Gesetz der Entropiezunahme, diese Sachverhalte, die viel zu unwahrscheinlich sind, um als „Zufall“, d. h. als Ergebnis von Schwingungsvorgängen gedeutet zu werden, zurückzuführen auf *noch* unwahrscheinlichere Verhältnisse der Vergangenheit — nämlich auf die Annahme früherer Existenz von Menschen, die diese Schriftzeichen hervorgebracht haben. Da die unwahrscheinlichen Verhältnisse eben diejenigen sind, welche nur auf verhältnismäßig *wenige* Weisen verwirklicht werden können, so kann sich aus der Untersuchung hinterlassener Spuren geradezu eine in erheblichem Umfang eindeutige Rekonstruktion der Vergangenheit ergeben.

Natürlich gilt dies für *alle* historischen Wissenschaften — zu denen ja auch die Mehrzahl der naturwissenschaftlichen Fächer gehört, trotz der abwegigen Behauptungen RICKERTS und WINDELBANDS, die das Historische zum Kennzeichen der Geisteswissenschaften, im Gegensatz zur Naturwissenschaft, machen wollten². Eindrucksvolles Beispiel ist z. B. die Tatsache, daß die Paläontologen von einer Tierart wissen, von der bislang noch keine versteinerten Knochen bekannt sind — nur versteinerte Kotballen dieses Tieres wurden in gewissen Fundstätten zahlreich entdeckt. Die zwingende Denkweise geschichtlicher Betrachtung — in diesem Falle im paläontologischen Bereich — macht es sogar bei diesen Kotballen unmöglich, sie als Erzeugnisse des Zufalls, als „Naturspiele“ zu deuten (als welche man vor Begründung der Paläontologie auch z. B. die versteinerten Muscheln der Alpenberge deuten wollte); man kommt zu dem Schluß auf die einstmalige Existenz einer entsprechenden Tierart.

II.

Schon vor Jahrzehnten hat RITZ in einer mit EINSTEIN geführten Diskussion die Überzeugung ausgedrückt, daß das *Nichtvorkommen zusammenlaufender Kugelwellen* in der Natur die eigentliche Wurzel der Irreversibilität sei — jedenfalls betrifft

der Irreversibilität von Strahlungsvorgängen. EINSTEIN hat diesen Gedanken ausdrücklich abgelehnt; aber es scheint jetzt, daß wir in diesem Punkte EINSTEIN korrigieren, und RITZ recht geben müssen — in einer umfassenden Erweiterung der RITZschen Vorstellung.

Man ist bekanntlich im Rahmen der MAXWELLSchen Theorie auf die mathematische Gleichberechtigung, aber physikalische Verschiedenheit von retardierten und avancierten Potentialen gestoßen: Wenn wir (der Einfachheit halber Vakuum voraussetzend) die MAXWELLSchen Gleichungen lösen wollen unter der Voraussetzung, daß gewisse felderzeugende Ladungen bestimmte, bereits bekannte Bewegungen ausführen, so ist die entsprechende Lösung zu superponieren aus einer beliebigen Lösung für den Fall der Abwesenheit von Ladung und Strom und derjenigen speziellen Lösung, welche durch retardierte Potentiale gegeben wird, d. h. so, daß jede Ladung einen Feldanteil beisteuert, welcher einer von ihr ausgehenden auslaufenden Kugelwelle entspricht. Statt dessen kann man auch einlaufende, zusammenlaufende Kugelwellen heranziehen — die Superposition beliebiger Lösungen der Wellengleichung dazu ergibt dann die gleiche Mannigfaltigkeit von Lösungen (für das Problem im Ganzen), wie bei Benutzung der retardierten Potentiale statt der avancierten — hierin wirkt sich die Tatsache aus, daß die zugrunde gelegten MAXWELLSchen Gleichungen nichts von Irreversibilität enthalten.

Betrachten wir aber eine Sendeantenne, so sehen wir durch sie ein aus *auslaufenden* Kugelwellen superponiertes Feld verwirklicht — während eine zusammenlaufende elektromagnetische Kugelwelle niemals zu verwirklichen ist. Ganz wie in den eingangs schon gemachten Bemerkungen haben wir zu sagen, daß das von RITZ hervorgehobene Prinzip eine engere *Auswahl* unter den mathematisch möglichen Lösungen der MAXWELLSchen Gleichungen trifft — gewisse dieser Lösungen werden als mathematische Modelle realer Vorgänge anerkannt, gewisse andere ausdrücklich verworfen.

Eine Folge hiervon ist es, daß es im Kosmos zwar leuchtende Sterne gibt, aber nicht solche, welche Licht einsaugen würden. Das Bild eines Licht einsaugenden Sterns bekommen wir, wenn wir die z. B. bei der Sonne vorliegenden Verhältnisse unter Umkehrung der Zeitrichtung betrachten: Wir sehen da, wie aus den Fernen des Weltalls konzentrisch Licht auf die Sonne zuströmt, in der Sonne dann die Um-

² Einige weitere Bemerkungen zu diesem Thema finden sich in meinem Buche „Der Naturwissenschaftler vor der religiösen Frage“, Verlag Stalling, Oldenburg 1963.

wandlung von He in H bewirkend. Auch die Schatten werfenden Körper — etwa die Planeten — beeinträchtigen nicht die Kugelsymmetrie des der Sonne zufließenden Energiestroms: Auf ihrer der Sonne zugewandten Seite sind die Planeten gerade heiß genug, um die — ihren Schatten entsprechende — Lückenhaftigkeit des aus größerer Ferne kommenden Lichtstroms auszugleichen. Sich dieses Bild etwas auszumalen, ist nützlich, wenn man sich die tiefe Merkwürdigkeit der einseitigen Zeitrichtung deutlich machen will.

Das Nichtvorkommen einlaufender Kugelwellen beschränkt sich aber keineswegs auf *elektromagnetische* Wellen — es gilt für alle Arten von Wellen, natürlich auch Schallwellen, oder Oberflächenwellen auf dem Wasser eines Teiches; aber auch für jede Art DE BROGLIEScher Materiewellen. Ein radioaktiver Atomkern ist Mittelpunkt einer auslaufenden Kugelwelle — wobei es sich entweder um die Materiewellen von α -Teilchen handelt oder um diejenigen von Elektronen (oder Positronen), zu denen noch diejenigen der Neutrinos hinzukommen. Dagegen gibt es in der Natur nicht den Fall, daß ein Atomkern, der zu einem als Ergebnis eines α -Zerfalls entstehenden Isotop gehört, nun in Zeitumkehr der Mittelpunkt einer in ihm zusammenlaufenden α -Teilchen-Welle würde.

Das Prinzip des Nichtvorkommens einlaufender Kugelwellen, wenn auf *alle* Wellenarten angewandt, scheint aber *ausreichend* zu sein, als Garantie der Irreversibilität in ihrem ganzen erfahrungsgemäß gegebenen Umfang zu wirken. BOLTZMANNs *H*-Theorem (1), welches eine Einseitigkeit der Zeitrichtung zum Ausdruck bringt, beruht ja auf alleiniger Anwendung a) der Mechanik, und b) des Stoßzahlansatzes; da in a) *keine* Auszeichnung einer Zeitrichtung besteht, so muß der Stoßzahlansatz für die BOLTZMANNsche Theorie die Wurzel der Zeit-Einseitigkeit bilden.

In der Tat enthält ja dieser Stoßzahlansatz, quantentheoretisch betrachtet, folgende Behauptung: Wenn zwei Atomstrahlen sich durchkreuzen, so wird ihr Durchkreuzungsgebiet zum Ausgangsgebiet einer auslaufenden DE BROGLIESchen Kugelwelle³. Wollte man im Stoßzahlansatz eine Umkehrung der Zeitrichtung vornehmen, so käme man also zu einem

Ergebnis, welches dem Nichtvorkommen einlaufender Kugelwellen widerspricht.

Man kann vermutlich auch die in positiver Zeitrichtung zunehmende Ungeordnetheit im geschüttelten Gefäß mit Sandkörnern oder mit hinreichend vielen Kugeln als Folge des Prinzips des Nichtvorkommens von einlaufenden Kugelwellen herleiten, obwohl die Einzelheiten dieser Herleitung noch nicht ganz zu übersehen sind⁴.

Das BOLTZMANNsche *H*-Theorem kann man verallgemeinern für Systeme, die im weitesten Sinne ideale Gasgemische sind, mit Bosonen und mit Fermionen. Als einfachsten Fall wollen wir nur die alte, 1912 gegebene EINSTEINSche Ableitung des PLANCKschen Gesetzes erwähnen, bei welchem die Rolle des Stoßzahlansatzes übernommen wird von den bekannten EINSTEINSchen Voraussetzungen über spontane Emission sowie negative und positive Absorption. Hier bildet — ganz im Sinne der RITZschen Vermutung — die *spontane Emission* das Hindernis für eine Zeitumkehr, jedenfalls dann, wenn es sich um den Verlauf von Vorgängen im Nichtgleichgewicht handelt. Erst im Gleichgewichtsfall sind (analog, wie auch in der BOLTZMANNschen Gastheorie) die von EINSTEIN formulierten Annahmen invariant gegen Zeitumkehr.

Die im obigen vorgetragenen Erwägungen scheinen fast trivial, wenn man sie fertig durchdacht hat. Trotzdem schien es dem Verfasser nicht überflüssig, sie einmal in dieser Ausführlichkeit vorzutragen, weil ein beträchtlicher Teil der Einzelheiten in dieser Darstellung doch wesentlich anders aussieht als in älteren Erläuterungen der Literatur. Von der hier erstrebten Präzisierung aus werden, wie mir scheint, die neuerdings ausgeführten Überlegungen betreffs des Zusammenhanges von Irreversibilität und Kosmologie leichter verständlich. Der Verfasser hat bereits vor fast 20 Jahren einmal den Gedanken ausgesprochen, daß die kosmische Expansion maßgebend sein dürfte für die in der Irreversibilität zutage tretende Unsymmetrie der Zeitrichtungen, nach vorwärts und nach rückwärts. Ich habe jedoch das mit dieser Bemerkung Angedeutete nicht weiter verfolgt, sondern bin erst jetzt durch Herrn BONDI darauf aufmerksam geworden, daß eine Reihe von Verfassern, insbesondere WHEELER, FEYNMAN, HOGARTH, GOLD und NARLIKAR⁵, neuerdings Über-

³ Das Wort „Kugelwelle“ soll hier natürlich nicht die Behauptung kugelförmiger Symmetrie enthalten.

⁴ Vgl. hierzu Anm. ¹.

⁵ Vgl. F. M. NARLIKAR, Proc. Roy. Soc., Lond. A **270**, 553 [1962] und die dort genannten Arbeiten.

legungen ausgeführt hat, durch welche das Prinzip des Nichtvorkommens einlaufender Kugelwellen eine tiefere Begründung erhalten hat — die also einerseits eine theoretische Garantie für die Erfüllung dieses Prinzips bedeutet, andererseits aber diese Erfüllung von bestimmten Voraussetzungen kosmologischer Art abhängig macht. Diese Voraussetzungen gehen dahin, daß der Kosmos expandiert, und daß er einerseits einen hohen Grad von Durchsichtigkeit besitzt (nur hierdurch wird ein ständig vom thermodynamischen Gleichgewicht stark abweichender Zustand ermöglicht), andererseits aber doch hinreichend opak ist, um zu gewährleisten, daß jedes emittierte Teilchen nach Zurücklegung eines Weges c/α (mit α = HUBBLE-Konstante) mit merklicher Wahrscheinlichkeit absorbiert (oder gestreut) wird. Unter diesen kosmologischen Voraussetzungen ergibt sich das Prinzip des Nichtauftretens von einlaufenden Kugelwellen auch dann als Folgerung, wenn man ausdrücklich, wie es in Rücksicht auf die Quantentheorie der Wellenfelder unumgänglich zu sein scheint, in der Formulierung der physikalischen Grundgesetze alle Elementarteilchen-Wechselwirkung mit einem gegen Zeitumkehr invarianten arithmetischen Mittelwert von retardierter und avancierter Wirkung beschreibt.

Die oben mehrfach hervorgehobene Tatsache, daß das Prinzip der in positiver Zeitrichtung zunehmenden Ungeordnetheit sowie ebenso das Prinzip des Nichtauftretens einlaufender Kugelwellen, eine engere *Auswahl* unter möglichen mathematischen Lösungen der zuständigen Differentialgleichungen bedeutet, muß uns darauf vorbereiten, daß die weitere Verfolgung diesbezüglicher Fragen in gewisse Schwierigkeiten führen dürfte, deren Klärung eingehende Untersuchungen erfordern wird. Denn während in der klassischen Theorie eine Unterscheidung zulässiger und nicht zugelassener Lösungen ohne grundsätzliche Schwierigkeit durchgeführt werden kann, ergibt sich ja in der Quantentheorie, daß die Lösungsgesamtheit in gewissem Sinne unteilbar ist, also keine Zerlegung in physikalisch anerkannte und nicht anerkannte Teile erlaubt. Diese Schwierigkeit

wird zwar in gewissem Umfang behoben durch die erwähnte Zurückführung des Entropieprinzips auf a) physikalische Grundgesetze, die gegen Umkehrung der Zeitrichtung invariant sind, und b) Eigenschaften des Kosmos. Trotzdem scheint es nicht von vornherein sicher, daß *alle* diesbezüglichen Schwierigkeiten damit bereits überwunden werden.

Das Übrigbleiben eines Restbestandes von Schwierigkeiten würde aber neue Anknüpfungsmöglichkeiten weiterer Überlegung geben; und dieser Punkt scheint deshalb reizvoll, weil der — von vielen Verfassern in verschiedener Weise geäußerte — Verdacht besteht, daß die *biologischen* Erscheinungen mit Einschränkungen des Entropiegesetzes zusammenhängen könnten. Zwar kann die Vorstellung, das Organische habe Fähigkeiten, Entropieverminderungen auszuführen, schwerlich ernst genommen werden; denn von einer solchen Hypothese aus würde uns alles unverständlich werden, was wir über den Stoff- und Energiewechsel der Organismen wissen. Die Lebenstätigkeit der Organismen scheint im Gegenteil auf einer ihrerseitigen Verstärkung oder Beschleunigung entropievermehrender Vorgänge zu beruhen — wodurch die notwendige Kompensation (und Überkompensation) für die Herstellung hochgradig geordneter Strukturen geliefert wird. Vielleicht könnte aber die auffällige Fähigkeit der Organismen zu einer solchen „Lenkung“ der Entropie-Erzeugung wiederum damit zusammenhängen, daß hier eine engere *Auswahl* aus der Mannigfaltigkeit der Lösungen für die Grundgleichungen eines bestimmten Systems getroffen wird.

Obwohl es z. Zt. noch nicht möglich scheint, diesen letzteren Andeutungen eine deutlichere Präzisierung zu geben, so sollten sie hier doch nicht unterdrückt werden, da sie den Eindruck bestärken können, der sich aus der erwähnten Zurückführung der Irreversibilität auf kosmologische Tatbestände ergeben muß: Nämlich den Eindruck, daß wir im Verständnis der Entropie und ihrer Gesetzmäßigkeiten noch nicht zum Abschluß gekommen, sondern inmitten eines Vordringens zu neuen tiefen Erkenntnissen sind.