

Entwicklung und Entropie¹

WOLFGANG BÜCHEL SJ

Wenn man in weltanschaulichem oder naturphilosophischem Zusammenhang von Entwicklung spricht, so denkt man dabei gewöhnlich zunächst an die Entwicklung des Lebens und der Organismen. Doch auch die unbelebte Natur hat ihre „Geschichte“, ihre Entwicklung; Sterne und Sternsysteme, Atome und Moleküle durchliefen und durchlaufen einen langen Weg des Entstehens und auch Vergehens. Während aber das organische Naturgeschehen durch eine aufsteigende Entwicklungslinie gekennzeichnet ist, durch den beständigen Übergang von einfacheren und primitiveren zu jeweils höheren und differenzierteren Gestalten und Funktionsweisen, ist es in der leblosen Natur eher umgekehrt: Die allgemeine Richtungstendenz, die das gesamte organische Naturgeschehen, vom größten bis zum kleinsten, bestimmt und die der Physiker in dem Satz von der Zunahme der Entropie zum Ausdruck bringt, kann wohl nur als unaufhörlicher Verfall, als beständiges Absinken charakterisiert werden. Wenn aber Absinken und Verfall — wie kam dann der Kosmos auf die Höhe, aus der er absinkt, und worin wird der Verfall einmal enden? Stellt die aufsteigende Entwicklungslinie im Bereich des Lebendigen vielleicht eine Gegenbewegung, eine Ausnahme von dem Gesetz des Verfalls dar, das die unbelebte Natur beherrscht? Fragen dieser Art haben seit je weltanschauliches Interesse geweckt.

ENTROPIE UND ENTROPIEZUNAHME

Was der Physiker mit dem Gesetz von der Zunahme der Entropie meint, läßt sich an einfachen Beispielen verdeutlichen. Es ist eine Erfahrungssache: Bringt man zwei Körper von verschiedener Temperatur zusammen und überläßt sie sich selbst, so gleicht sich ihr Temperaturunterschied im Lauf der Zeit von selbst aus; legt man etwa eine heiße Wärmflasche in ein kaltes Bett, so wird allmählich das Bett warm, und die Wärmflasche kühlt sich ab. Ähnliches geschieht im allgemeinen auch sonst in der Welt, wo wir Temperatur- oder allgemeiner Intensitätsunterschiede, also Druck-, Konzentrationsunterschiede oder dergleichen, finden: Die Unterschiede gleichen sich im allgemeinen von selbst aus, und niemals hat man gefunden, daß etwa eine heiße Wärmflasche in einem kalten Bett noch wärmer und das Bett noch kälter geworden wäre.

¹ Als Vortrag gehalten auf einer Tagung der Katholischen Akademie in Bayern über „Das naturwissenschaftliche Verständnis von Welt und Leben“. Der Vortrag wird zusammen mit den übrigen Vorträgen in den „Studien und Berichten der Katholischen Akademie in Bayern“ im Echter-Verlag, Würzburg, erscheinen.

Wir sagten eben: „im allgemeinen“; denn es gibt eine große Einschränkung, der der Ausgleich der Intensitätsunterschiede unterworfen ist. Betrachten wir etwa die Entwicklung der Sterne und Sternsysteme. Fast alle einschlägigen Theorien gehen von einem Anfangszustand aus, in dem die Materie in Form von Staub oder Gas diffus-gleichmäßig im Weltraum verteilt ist. Zufällig bilden sich hier oder dort einzelne Verdichtungen, und wenn einmal solche Verdichtungszentren vorhanden sind, ziehen sie infolge der Schwerkraft immer mehr der umgebenden Materie an sich heran und schließen sich gleichzeitig in sich selbst immer enger zusammen. So entstehen allmählich lockere und dann dichtere Gas- und Staubballen, aus denen sich schließlich Sterne und Sternsysteme entwickeln. Die Verdichtung und Zusammenziehung ist verbunden mit einer Erhitzung des neu entstehenden Sternes; denn die bei der Zusammenziehung freiwerdende Schwereenergie wird in Wärmeenergie verwandelt. Hier haben wir also einen Fall, wo sich aus einem anfänglich homogenen Zustand Konzentrations- und Temperaturunterschiede von selbst entwickeln.

Entscheidend ist nun dies: Die Entwicklung der Konzentrations- und Temperaturunterschiede ist in dem obigen Beispiel verbunden mit der Verwandlung von Schwereenergie in Wärmeenergie; und auf die Verwandlung der von der Wärme verschiedenen Energieformen in Wärmeenergie ist die Natur derart „erpicht“, daß sie dafür die Entstehung von Temperatur- und Konzentrationsunterschieden „in Kauf nimmt“. Allgemein müssen wir also sagen, daß der Richtungssinn des Geschehensablaufs in der unbelebten Natur in erster Linie durch die Verwandlung der von der Wärme verschiedenen Energieformen in Wärmeenergie bestimmt ist; dazu tritt dann das Streben nach dem Ausgleich der Intensitätsunterschiede. Der Physiker kennt eine Größe, die sogenannte Entropie, die ein Maß für den Grad der Verwandlung der Energie in Wärmeenergie und des Ausgleichs der Intensitätsunterschiede darstellt; der Physiker kann darum alle beschriebenen Vorgänge in dem Satz zusammenfassen, daß die Entropie eines abgeschlossenen Systems stets zu- und niemals abnimmt.

An diese Erkenntnis, die Rudolf Clausius und Lord Kelvin in den Jahren 1850 bzw. 1851 genau bestimmten und formulierten, hat man verschiedentlich die folgende Überlegung angeknüpft: Wenn die Welt von Ewigkeit her bestände, so müßte sich die ursprünglich vorhandene Energie schon fast gänzlich in Wärmeenergie verwandelt haben, und die ursprünglich vorhandenen Intensitätsunterschiede hätten sich im Lauf dieser unendlich langen Zeit schon so weit ausgeglichen, daß sie praktisch nicht mehr erkennbar wären. Nun finden wir aber tatsächlich in der Welt noch sehr große Intensitätsunterschiede und große Energiemengen vor, die von der Wärme verschieden sind; also kann die Welt nicht von Ewigkeit her bestehen, sondern muß einen zeitlichen Anfang gehabt haben.

ENTROPIE UND WAHRSCHEINLICHKEIT

Vor der Diskussion über eine solche weltanschauliche Schlußfolgerung muß man sich fragen, worin denn eigentlich der innere Grund für die Verwandlung aller Energie in Wärmeenergie und den Ausgleich der Intensitätsunterschiede zu suchen ist. Kurz zusammengefaßt ist die Antwort etwa die: Wenn wir ein abgeschlossenes System haben, in dem anfänglich Intensitätsunterschiede vorhanden waren und dazu Energie, die keine Wärmeenergie war, und wenn sich später die Intensitätsunterschiede ausgeglichen haben und alle Energie zu Wärmeenergie geworden ist, dann ist der Endzustand dieses Systems ungeheuer *wahrscheinlicher* als der Anfangszustand. Der Grund für die Verwandlung aller Energie in Wärmeenergie und für den Ausgleich der Intensitätsunterschiede liegt einfach darin, daß unwahrscheinliche Zustände immer danach „streben“, in wahrscheinlichere Zustände überzugehen.

Betrachten wir als physikalisches System etwa zwei Ziegelsteine, die aufeinander liegen und von der übrigen Welt gänzlich abgeschlossen sind. Die Physik sagt: Der Zustand, in dem die beiden Steine die gleiche Temperatur haben, ist ungeheuer *wahrscheinlicher* als der Zustand, in dem sie verschiedene Temperatur haben. Was ist unter dieser „Wahrscheinlichkeit“ eines Zustands zu verstehen?

Um das zu erfassen, müssen wir zwischen dem „Makrozustand“ und dem „Mikrozustand“ des Systems unserer zwei Ziegelsteine unterscheiden. Der *Makrozustand* ist gekennzeichnet durch all die Angaben, die man auf Grund einer makrophysikalischen Betrachtung des Systems machen kann; dazu gehört die Angabe des Gewichts der Steine, ihres Volumens, ihrer Temperatur. Um den *Mikrozustand* des Systems zu kennzeichnen, müßte man für jedes einzelne Atom und Molekül der Steine genau angeben, wo es sich befindet, in welcher Richtung es sich bewegt, wie groß die Geschwindigkeit seiner Bewegung ist usw. Es liegt auf der Hand, daß ein und derselbe Makrozustand durch sehr viele voneinander verschiedene Mikrozustände realisiert werden kann. Wenn z. B. für jeden Stein genau vorgeschrieben ist, wie groß sein Gewicht sein soll, wie er auf dem anderen Stein zu liegen hat, wie groß seine Temperatur ist, dann kann dieser so eindeutig festgelegte Makrozustand durch sehr viele verschiedene Anordnungen der Atome innerhalb der Steine, also durch sehr viele verschiedene Mikrozustände realisiert werden.

Nun kommt das Wesentliche: Die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes ist proportional zur Anzahl der Mikrozustände, durch die er realisiert werden kann. Die Physik ist in der Lage auszurechnen, wieviele verschiedene Mikrozustände zu einem bestimmten Makrozustand gehören. Es ergibt sich: Zu dem Makrozustand, bei dem die Temperatur der beiden Steine gleich ist, gehören ungeheuer viel mehr verschiedene Mikrozustände als zu einem Makrozustand, bei dem unter im übrigen gleichen Bedingungen die beiden Steine eine verschiedene Temperatur haben. In diesem Sinn gilt, daß ein

Makrozustand mit gleicher Temperatur der Steine ungeheuer viel wahrscheinlicher ist als ein Makrozustand mit verschiedener Temperatur. Haben wir also zu Beginn einen Makrozustand mit verschiedener Temperatur und überlassen das System sich selbst, so wird der anfängliche, ziemlich unwahrscheinliche Zustand mit überwältigender Wahrscheinlichkeit in einen wahrscheinlicheren Zustand übergehen, eben in den Zustand mit gleicher Temperatur der Steine.

Die grundlegende Gesetzlichkeit, die wir feststellen, ist also die, daß die anorganische Welt im Lauf der Zeit in immer wahrscheinlichere Makrozustände übergeht; und ein Makrozustand ist im allgemeinen um so wahrscheinlicher, je mehr Energie in Wärmeenergie verwandelt und je mehr anfänglich vorhandene Intensitätsunterschiede ausgeglichen wurden. Es zeigt sich weiter, daß die physikalische Größe „Entropie“, von der wir oben sprachen, nichts anderes als ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes darstellt; der Satz von der Zunahme der Entropie ist also nur ein anderer Ausdruck für den Übergang in immer wahrscheinlichere (Makro-) Zustände.

DIE ENTROPIE DES UNIVERSUMS UND DER DIALEKTISCHE MATERIALISMUS

Der Entropiesatz gilt zunächst nur für abgeschlossene, endliche physikalische Systeme. Es erscheint aber naheliegend, ihn auf das Weltall als Ganzes zu übertragen und zu sagen: Die Entropie des Weltalls als Ganzen nimmt beständig zu und niemals ab; das Weltall als Ganzes gerät aus anfänglichen unwahrscheinlichen Zuständen in immer wahrscheinlichere Zustände hinein. Schließlich kommt man dann zu der Frage, wie denn das Weltall in seinen anfänglichen, ganz unwahrscheinlichen Zustand hineingekommen sei.

Wir sagten eben, es erscheine naheliegend, den Entropiesatz auf das Weltall als Ganzes anzuwenden. Unbedingt zwingend ist eine solche Auffassung nicht. Das Weltall könnte z. B. unendlich sein, und es wäre nicht ganz einfach, die Entropie eines unendlichen Weltalls überhaupt zu definieren. Aber immerhin: Soweit wir sehen, scheint alles darauf hinzudeuten, daß jedenfalls in dem unserer Beobachtung zugänglichen Teil des Kosmos die Entropie überall beständig zunimmt. Es bleibt also die Frage, wie der uns bekannte Teil des Kosmos in seine früheren unwahrscheinlichen Zustände hineingekommen ist.

Diese Frage beschäftigte schon *Friedrich Engels*, als er in seinen Schriften über die „Dialektik der Natur“ den dialektischen Materialismus als Ergebnis der „philosophischen Verallgemeinerung“ der naturwissenschaftlichen Erkenntnis zu erweisen versuchte. Die wohl nächstliegende Annahme einer Erschaffung der Welt, bei der der Schöpfer den Kosmos in einem anfänglichen sehr unwahrscheinlichen Zustand erschaffen hätte, scheidet für den Atheisten Engels von vornherein aus. Engels durchmustert dann die verschiedenen Versuche, die man schon zu seiner Zeit unternommen hatte, um

das Zustandekommen des unwahrscheinlichen Anfangszustandes ohne die Annahme eines Schöpfers zu erklären; er muß jedesmal feststellen, daß sie zu keinem befriedigenden Ergebnis führen. Engels entschließt sich darum, den gordischen Knoten zu durchhauen, indem er erklärt: Es muß Naturvorgänge geben, bei denen die Entropie nicht zu-, sondern abnimmt; und wenn die Physik solche Vorgänge bis jetzt noch nicht entdeckt hat, dann wird sie sie eben in Zukunft entdecken².

Man wird sich fragen, was das bedeuten soll: Vorgänge, bei denen die Entropie abnimmt, also Vorgänge, bei denen ein abgeschlossenes System von selbst und ohne äußeres Zutun aus einem wahrscheinlichen in einen ungeheuer unwahrscheinlichen Zustand hineingeraten soll! Dazu ist zu bemerken, daß der Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit Engels noch nicht bekannt war. Engels wußte nur, daß alle Energie danach strebt, sich in Wärmeenergie zu verwandeln; und von diesem Standpunkt aus konnte es als immerhin nicht ganz aussichtslos erscheinen, die Existenz von Vorgängen zu postulieren, bei denen Wärmeenergie sich wieder in andere Energieformen zurückverwandeln soll.

Es war in den Jahren um 1875, als Engels die Entdeckung von Vorgängen mit Entropieabnahme voraussagte. Hat sich diese Voraussage inzwischen bestätigt? 1955 erschien in Berlin die zweite Auflage der offiziellen Ausgabe der „Dialektik der Natur“. In der Einleitung heißt es bezüglich der Stellung Engels' zum Entropiesatz: „Die Entwicklung der Wissenschaft bestätigte, daß Engels recht hatte.“³ Worin diese Bestätigung bestehen soll, wird leider nicht angegeben. Schaut man sich in den Büchern moderner materialistischer Autoren um, so findet man zumeist den Hinweis, daß die Übertragung des Entropiesatzes auf das Weltall als Ganzes wegen mancher Dunkelheiten und Unklarheiten nicht unbedingt zwingend ist⁴. Das ist, wie schon oben bemerkt, sehr richtig; aber Engels hatte nicht nur zur Vorsicht bei der Anwendung des Entropiesatzes mahnen wollen, sondern er hatte positiv die Existenz von Vorgängen mit Entropieabnahme behauptet. Diesbezüglich findet man bei den materialistischen Autoren nur gelegentlich Verweise auf gewisse Vorgänge, bei denen es auf den ersten Blick vielleicht nicht völlig klar ist, ob bei ihnen die Entropie zunimmt oder nicht⁵. Über den Wert dieser Beispiele besitzen wir ein sehr treffendes Urteil von dem Leipziger Chemiker Dr. Wolfgang Krah, der selbst auf dem Boden des dia-

² F. Engels, *Dialektik der Natur*, Berlin 1955, 303 f.

³ a.a.O. XIII.

⁴ Vgl. etwa J. Bohr, *Das Problem der Entropie des Weltalls und der Diamat*, in: *Osteuropa-Naturwissenschaft* 3 (1959) 105—117.

⁵ G. Klaus erklärt beispielsweise, im subatomaren Bereich liefen stets auch Elementarprozesse „ektropischer“, d. h. entropievermindernder Natur ab, und er sieht vor allem in der Verwandlung von Gammaquanten in Elektron-Positron-Paare eine „glänzende Bestätigung“ der Voraussage von Engels (G. Klaus, *Jesuiten, Gott, Materie*, Berlin 1958, 177 f.). Daß in Wirklichkeit bei allen atomaren und subatomaren Prozessen, speziell auch bei der Verwandlung der Gammaquanten, die Entropie zunimmt, ist ausführlich ausgerechnet bei O. Costa de Beauregard, *Théorie Synthétique de la Relativité Restreinte et des Quanta*, Paris 1957, 171—175.

lektischen Materialismus steht, aber 1957 in einem Artikel zur Frage des Entropiesatzes erklären mußte: „Beim augenblicklichen Stand unserer Erkenntnisse kann man nicht daran gehen, Fakten aufzuzeigen, die gegen den zweiten Hauptsatz (= Entropiesatz) sprechen. Man muß sich vielmehr einstweilen mit der bloßen Aufzeigung von Denkmöglichkeiten bescheiden, die diesen Satz einschränken. Aber das“, so meint Krah, „ist dennoch nicht unnütz.“⁶

ENTROPIE UND ZUFALL

Es soll hier jedoch nicht auf die von Krah diskutierten Denkmöglichkeiten eingegangen werden, sondern es sei auf zwei Überlegungen zum Entropiesatz hingewiesen, von denen die eine auf den genialen Physiker *Ludwig Boltzmann* zurückgeht, während sich die andere aus der allgemeinen Relativitätstheorie ergibt. Ludwig Boltzmann war es, der in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts die wahrscheinlichkeitstheoretische Bedeutung des Entropiesatzes erkannte. Zu der Frage, wie der uns bekannte Teil des Kosmos in seinen anfänglichen, äußerst unwahrscheinlichen Zustand gekommen sei, entwickelte Boltzmann als mögliche Vermutung den folgenden Gedanken, der auf den ersten Blick gewiß bestechend erscheinen muß⁷.

Boltzmann sagt: Der unserer Beobachtung zugängliche Teil des Kosmos sei einmal als unsere „Teilwelt“ bezeichnet. Die mathematische Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Teilwelt von der Größe der unseren durch das Walten bloßen Zufalls in einen entropiearmen, also sehr unwahrscheinlichen Zustand gerät, ist äußerst klein. Ihren Wert kann man als $1:N$ bezeichnen, wenn N eine ungeheuer große, aber immerhin nicht unendlich große Zahl bedeutet.

Was heißt das aber eigentlich: Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Teilwelt durch bloßen Zufall in einen entropiearmen Zustand gerät, ist $1:N$? Es heißt: Wenn wir N Teilwelten gleicher Größe gleichsam nebeneinander legen, dann wird von diesen N Teilwelten eine von selbst und durch Zufall in einen entropiearmen Zustand geraten, während die anderen Teilwelten in einem entropiereichen Zustand verbleiben. Und wenn wir mehr als N Teilwelten nebeneinander haben, etwa $1000:N$ Teilwelten, dann werden davon ungefähr 1000 Teilwelten von selbst in einen entropiearmen Zustand geraten.

Wieviele Teilwelten von der Größe der unseren gibt es nun in der wirklichen Welt? Die Frage ist völlig offen; wir müssen deshalb auch die Möglichkeit offenlassen, daß die Anzahl der Teilwelten, aus denen der wirkliche Kosmos besteht, viel größer ist, vielleicht tausendmal größer oder noch

⁶ W. Krah, Überlegungen zum Problem des sogenannten universellen Wärmetodes, in: *Wissenschaftl. Zschr. d. Technischen Hochschule Dresden* 7 (1957/58) 169–176, hier 172.

⁷ L. Boltzmann, Vorlesungen über Gastheorie II, Leipzig 1898, 256 ff.

mehr als die eben genannte Zahl N . Wenn es im ganzen Kosmos N Teilwelten gäbe, dann könnte eine davon durch bloßen Zufall in einen Zustand geringer Entropie geraten. Wenn es aber im ganzen Kosmos nicht nur N Teilwelten gäbe, sondern $1000 \cdot N$ oder noch mehr, dann wäre es sogar praktisch gewiß, daß es irgendwo im weiten Kosmos Teilwelten gibt, die durch bloßen Zufall in einen Zustand geringer Entropie geraten.

Soweit der erste Schritt der Überlegungen Boltzmanns. Er ist logisch nicht anfechtbar, und auch die Möglichkeit, daß die Anzahl der Teilwelten im Kosmos sehr groß, vielleicht tausendmal größer als N ist, muß jedenfalls zur Zeit durchaus offengelassen werden. Es ist also durchaus mit der Möglichkeit zu rechnen, daß irgendwo im Kosmos Teilwelten von der Größe der unseren von selbst in einen Zustand geringer Entropie geraten. Aber nun kommt erst das Entscheidende: Wir interessieren uns ja gar nicht für *irgendeine* Teilwelt *irgendwo* weit draußen im Kosmos, die vielleicht durch Zufall in einen entropiearmen Zustand geriet, sondern wir möchten wissen, warum sich *unsere* Teilwelt in einem entropiearmen Zustand befindet.

Auf diese Frage antwortet der zweite Teil der Boltzmannschen Überlegungen. Boltzmann sagt: Wenn sich je irgendwo im weiten Kosmos lebendige Wesen entwickeln werden, dann können sie sich nur in solchen Teilwelten entwickeln, die sich in einem Zustand geringer Entropie befinden. Das ist durchaus richtig; Lebewesen sind nur in einer entropiearmen Umgebung überhaupt existenzfähig. Lebewesen können darum ausschließlich in den Teilwelten entstehen, die durch Zufall in einen entropiearmen Zustand gerieten, und wenn es jemals denkende und Physik treibende Lebewesen gibt, so werden sie notwendigerweise immer feststellen, daß gerade ihre Teilwelt sich in einem sehr entropiearmen Zustand befindet.

Damit ist erklärt, warum wir Menschen gerade in einer von den doch verhältnismäßig sehr wenigen Teilwelten leben, die durch bloßen Zufall in einen entropiearmen Zustand gerieten: Weil wir in einer anderen Teilwelt gar nicht existieren könnten.

Soweit die Überlegungen Boltzmanns. Sie sind vielleicht auch aus dem Grund erwähnenswert, weil man ja gelegentlich in apologetischen Zusammenhängen mit ähnlichen Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen zu arbeiten geneigt war. Zunächst ist gegen die Überlegung Boltzmanns nichts einzuwenden; sie ist logisch schlüssig, und die Möglichkeit, daß der Kosmos als Ganzes überwältigend größer ist als unsere Teilwelt, muß durchaus offengelassen werden. Die Schwierigkeiten der Boltzmannschen Auffassung zeigen sich erst, wenn man die letzten Konsequenzen aus ihr zieht. Es ergibt sich nämlich, daß bei Zugrundelegung der Boltzmannschen Auffassung sämtliche Aussagen, die wir über vergangenes Geschehen machen, unzutreffend wären, seien es nun Aussagen auf Grund von Erinnerungswissen, auf Grund geschichtlicher Dokumente oder auch auf Grund naturwissenschaftlicher, naturgesetzlicher Rückschlüsse. Derartige Konsequenzen sind natürlich unannehmbar und widersprechen den Grundsätzen jeder naturwissenschaft-

lichen Forschung. Immerhin ist es wohl nicht ganz leicht zu zeigen, *warum* eigentlich die Boltzmannsche Überlegung falsch ist, *wo* der Fehler steckt; hier dürfte ein echtes erkenntnistheoretisches Problem vorliegen, das jedoch über den Rahmen unseres Themas hinausführen würde⁸.

Es sei nur kurz angedeutet, inwiefern sich aus der Boltzmannschen Hypothese die Ungültigkeit aller Aussagen über vergangenes Geschehen ergäbe. Bei allen Aussagen über die Vergangenheit wird, das ist zunächst zu beachten, einschlußweise vorausgesetzt, daß in der Vergangenheit die Entropie unserer Teilwelt zu- und nicht abnahm. Wir stellen z. B. auf einem beschriebenen Blatt Papier Konzentrationsunterschiede in der Verteilung der Tinte auf dem Blatt fest, und da wir voraussetzen, daß derartige Konzentrationsunterschiede nicht „von selbst“ entstanden sind, schließen wir auf einen Schreiber, der diese Konzentrationsunterschiede hervorgebracht, d. h. das Papier beschrieben hat. Ähnlich der Archäologe, der die Grundmauern eines verfallenen Gebäudes ausgräbt: Er setzt voraus, daß der von ihm beobachtete Konzentrationsunterschied in der Verteilung der Steine im Erdboden nicht „von selbst“ entstanden ist, und schließt so auf einen Baumeister. Auch unser Vertrauen auf unser Erinnerungswissen ist nur gerechtfertigt, wenn wir voraussetzen dürfen, daß die Gedächtnisspuren in unserem Gehirn nicht „von selbst“ entstanden sind, sondern auf entsprechende frühere Wahrnehmungen usw. zurückgehen. Wenn wir so voraussetzen, daß die beschriebenen „Konzentrationsunterschiede“ nicht „von selbst“ entstanden sind, sondern sich „von selbst“ höchstens abgeschwächt haben, dann setzen wir damit voraus, daß in der Vergangenheit die Entropie unserer Teilwelt zu- und nicht abnahm; denn in einer Welt mit abnehmender Entropie würden sich nicht nur ganz allgemein Temperatur- und Intensitätsunterschiede von selbst bilden, sondern auch „Konzentrationsunterschiede“ von der oben angegebenen Art. — Eine solche Überlegung wirkt zunächst vielleicht etwas überraschend; aber sie macht nur deutlich, daß der Satz von der Zunahme der Entropie nicht irgendein spezielles Naturgesetz darstellt, sondern für das ganze menschliche Erkennen und Handeln von grundlegender Bedeutung ist.

Die Boltzmannsche Hypothese führt nun in konsequenter Durchführung zu der Folgerung, daß bis auf den gegenwärtigen Augenblick die Entropie unserer Teilwelt nicht zu-, sondern abgenommen habe und erst von der Gegenwart an wieder zunimmt, und sie entzieht damit allen Aussagen über vergangenes Geschehen ihre logische Voraussetzung. Das läßt sich wie folgt einsehen:

Gemäß der Boltzmannschen Auffassung geraten in dem ungeheuer großen Gesamtkosmos immer wieder Teilwelten durch bloßen Zufall in einen Zustand ähnlich dem, in dem sich unsere eigene Teilwelt vor Milliarden von Jahren befand. Es geraten aber noch viel mehr Teilwelten direkt und ohne

⁸ Vgl. W. Büchel, Das H-Theorem und seine Umkehrung, in: *Philosophia Naturalis* 6 (1960) 168 ff.; *Physikal. Blätter* 17 (1961) 350 ff.

Zwischenschaltung solcher „jüngerer“ Zustände in einen Zustand ähnlich dem, in dem sich unsere Teilwelt heute befindet. Denn dieser heutige „ältere“ Zustand unserer Teilwelt ist ungeheuer entropiereicher, also ungeheuer viel wahrscheinlicher als der „jüngere“ Zustand vor Milliarden von Jahren (die Existenz von Lebewesen als unwahrscheinlichen Gebilden ändert daran nichts; vgl. weiter unten). Infolgedessen werden im Gesamtkosmos ungeheuer viel mehr Teilwelten durch bloßen Zufall lediglich in einen solchen „älteren“ (= wahrscheinlicheren) Zustand hineingeraten, ohne überhaupt durch einen „jüngeren“ (= unwahrscheinlicheren) Zustand hindurchzugehen; und nur verhältnismäßig ganz wenige Teilwelten werden auf dem unwahrscheinlichen „Umweg“ über einen „jüngeren“ Zustand in die „älteren“ Zustände hineingelangen. Wenn dem aber so ist, dann spricht die überwältigende Wahrscheinlichkeit dafür, daß auch unsere eigene Teilwelt eine von jenen ist, die nicht durch „jüngere“ Zustände hindurchgingen. Und wenn unsere Teilwelt nicht durch „jüngere“, also entropieärmere Zustände hindurchgegangen ist, dann hat eben in der Vergangenheit bis auf den heutigen Tag die Entropie unserer Teilwelt nicht zu-, sondern abgenommen; und damit ist, wie oben gezeigt, allen Aussagen über vergangene Geschehnisse der Boden entzogen.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Wir hatten eingangs gesehen, daß der Satz von der Zunahme der Entropie einen Richtungscharakter des unbelebten Naturgeschehens zum Ausdruck bringt: Alles Geschehen verläuft in der Art, daß unwahrscheinlichere Zustände in wahrscheinlichere übergehen. Die Boltzmannsche Hypothese stellt nun den Versuch dar, diesen Richtungscharakter des unbelebten Naturgeschehens gleichsam wegzudisputieren. Nach der Boltzmannschen Hypothese wäre unsere Teilwelt mit ihrer zunehmenden Entropie nur eine zufällige Ausnahme in einem ungeheuer größeren Kosmos, der sich seit jeher im Zustand maximaler Entropie, im allerwahrscheinlichsten Zustand befand und in dem nur durch Zufall hie und da gelegentlich einmal Teilwelten in unwahrscheinlichere Zustände geraten, aus denen sie dann wieder in den wahrscheinlichsten Zustand zurückkehren. Diese Auffassung ist, wie gesagt, in letzter Konsequenz unhaltbar; der Richtungscharakter des anorganischen Naturgeschehens läßt sich nicht wegdisputieren.

ENTROPIESATZ UND RELATIVITÄTSTHEORIE

Wie steht es mit dem Richtungscharakter des anorganischen Naturgeschehens, wenn wir das Problem vom Standpunkt der *allgemeinen Relativitätstheorie* aus betrachten? Hier geht es vor allem um die *Expansion des Universums*. Daß sich unser Universum gegenwärtig in einer Expansionsphase befindet, daß sich alle Abstände zwischen den großen Sternsystemen laufend vergrößern, wird durch die Beobachtungstatsachen jedenfalls sehr wahrscheinlich gemacht. Wird diese Expansion anhalten, stellt auch sie ein

Richtungselement des anorganischen Naturgeschehens, im Großen betrachtet, dar, oder wird die Expansion eines Tages zum Stillstand kommen und in eine Kontraktion umschlagen? Aus den Beobachtungsgegebenheiten kann man, wenn überhaupt, nur entnehmen, daß die Geschwindigkeit der Expansion abzunehmen scheint. Ob diese Verlangsamung der Expansion eines Tages zum Stillstand und dann zur Kontraktion führt, darüber läßt sich nur auf Grund der physikalischen Theorie eine Aussage machen. Natürlich gibt es mehrere, zum Teil einander widersprechende einschlägige Theorien; aber die nächstliegende Auffassung ist doch wohl die, daß man sich einfach auf den Boden der allgemeinen Relativitätstheorie stellt, ohne diese durch ad hoc eingeführte Zusatzannahmen abzuändern.

Von diesem Standpunkt aus ist dann zu sagen: Der Übergang bzw. Nichtübergang zu einer Kontraktionsphase hängt davon ab, ob der Weltraum unendlich und „offen“ oder endlich und „geschlossen“ ist. Unendlich und „offen“ ist der Weltraum, wenn man in jeder beliebigen Richtung immer weiter geradeaus in den Raum hinausfliegen kann, ohne jemals zum Ausgangspunkt zurückzukehren; endlich und „geschlossen“ ist der Weltraum, wenn man, nachdem man hinreichend lange immer geradeaus in den Raum hinausgeflogen ist, auf einmal zum Ausgangspunkt zurückkommt — so ähnlich, wie man auf einer Kugeloberfläche immer „geradeaus“ gehen kann und letztlich doch, um die ganze Kugel herum, zum Ausgangspunkt zurückkehrt. Die Theorie in ihrer einfachsten Form sagt nun: Wenn der Weltraum unendlich und offen ist, dann wird die Expansion zwar immer langsamer werden, aber sie wird nie zum völligen Stillstand kommen, die Expansion schlägt nie in eine Kontraktion um. Ist der Weltraum aber geschlossen und endlich, dann kommt die Expansion eines Tages zum Stillstand und geht in eine Kontraktion über. Ob der Weltraum offen und unendlich ist, darüber lassen zur Zeit die Beobachtungstatsachen keinerlei Entscheidung zu, und von der Theorie her sind beide Annahmen gleich gut möglich. Wir müssen also jedenfalls mit der Möglichkeit rechnen, daß unsere Welt eines Tages in eine Kontraktionsphase übergeht. Was würde das für die großen Entwicklungslinien des anorganischen Naturgeschehens bedeuten?

Zunächst käme in den Ablauf des anorganischen Naturgeschehens eine gewisse Periodizität hinein. Während der Expansion verläuft das Naturgeschehen in der bekannten Weise. Die Kontraktion aber führt nach hinreichend langer Zeit zu einer Verdichtung der Materie und damit zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Temperatur des Universums. Schließlich wird die Temperatur so hoch, daß alle Festkörper schmelzen, alle Flüssigkeiten verdampfen und fortschreitend Moleküle, Atome und vielleicht sogar Atomkerne in ihre Bestandteile aufgelöst werden. Es läuft also gleichsam die Umkehrung des Prozesses ab, der in der Expansionsphase zur Bildung von Atomen, Molekülen und Festkörpern führte; alle Gestalten, die sich im Weltall gebildet hatten, werden gleichsam wieder „eingeschmolzen“.

Wird es danach zu einer erneuten Expansion kommen? Streng nach den

Formeln der allgemeinen Relativitätstheorie wäre ein Übergang von einer Kontraktion zu einer erneuten Expansion eigentlich nicht möglich. Aber es ist durchaus damit zu rechnen, daß unter solch extremen Bedingungen Faktoren wirksam werden, die in den Formeln unserer bisherigen Theorien noch nicht erfaßt sind; darum kann die Möglichkeit des Übergangs zu einer erneuten Expansion wohl nicht strikt ausgeschlossen werden.

Erhielte damit das Weltgeschehen, im Großen betrachtet, den Charakter eines ewigen Auf und Ab, einer ewigen „Wiederkehr des Gleichen“? Nicht ganz; denn durch die Zunahme der Entropie wird auch hier ein gewisser Richtungssinn des Geschehens festgelegt. Der amerikanische Physiker *Richard C. Tolman* hat dieses Problem schon seit langem eingehend untersucht und kommt zu folgendem Ergebnis: Während jeder Expansion und Kontraktion nimmt die Entropie des Universums zu. Diese Zunahme der Entropie hat merkwürdigerweise auch eine Zunahme der Energie des Universums zur Folge⁹. Das bedeutet: Wenn bei der Kontraktion der Weltraum auf eine bestimmte Größe zusammengeschrumpft ist und wenn man diesen Zustand des Universums mit demjenigen Stadium der Expansionsphase vergleicht, in dem der Weltraum die gleiche Größe hatte, dann ist die Summe aller Massen und Energien bei gleicher Größe des Weltraums in der Kontraktionsphase größer als in der Expansionsphase. Bei jedem neuen Zyklus von Expansion und Kontraktion wiederholt sich diese Energiezunahme, und so wächst die Energie und Masse des Weltalls stetig und ohne Grenzen an. Zugleich damit nimmt die Entropie unbegrenzt zu; ein Maximum der Entropie, ein sogenannter „Wärmetod“, bei dem alle Energie in Wärme verwandelt und damit alle makrophysikalischen Prozesse zum Stillstand gekommen wären, tritt niemals ein. Die Zunahme der Energie hat außerdem zur Folge, daß sich der Weltraum bei jeder neuen Expansion etwas weiter aufbläht als bei der vorherigen; das maximale Volumen des Weltraums, bei dem der Übergang von der Expansion zur Kontraktion erfolgt, ist bei jedem neuen Zyklus größer als bei dem vorhergehenden.

Es mag befremdlich erscheinen, daß die Gesamtsumme der Masse und Energie fortgesetzt zunehmen soll, während man doch gewöhnlich hört, daß gemäß dem Gesetz von der Erhaltung der Masse und Energie die Gesamtsumme aller Massen und Energien bei allen Naturvorgängen konstant bleibe. Dazu ist zu bemerken, daß das Gesetz von der Erhaltung der Masse und Energie in der allgemeinen Relativitätstheorie eine Form annimmt, die man ebensogut als „Erhaltungsgesetz“ wie auch als „Nichterhaltungsgesetz“ bezeichnen könnte. Rein mathematisch und formal kann man auch in der Relativitätstheorie von einer Erhaltung der Energie sprechen. Man muß dann die Gravitationsenergie mit einem negativen Vorzeichen ansetzen, die anderen Energieformen, einschließlich der Massenenergie, mit einem positiven Vorzeichen, und dann ist in unserem Fall die negative Gravitations-

⁹ *R. C. Tolman, Relativity, Thermodynamics and Cosmology, Oxford 1950.*

energie gerade immer ebenso groß wie die anderen positiven Energien; die Gesamtenergie des Universums ist also immer gerade gleich Null.

Rein mathematisch gesehen ist so alles in bester Ordnung. Physikalisch gesehen erscheint jedoch diese negative Gravitationsenergie, die die Energiebilanz auf dem konstanten Wert Null hält, als ein sehr merkwürdiges Gebilde. Es handelt sich bei ihr eher um eine Rechengröße als um eine reale physikalische Energie, d. h. eine Fähigkeit, Arbeit zu leisten; denn es gilt auf jeden Fall: In jedem neuen Zyklus des Universums kann mehr Arbeit geleistet werden als in der vorhergehenden Phase, auch soweit diese Arbeit durch Gravitationskräfte zu leisten ist. Im real-physikalischen Sinn muß man also eher von einer Vermehrung und nicht von einer Erhaltung der Energie und ebenso der Masse sprechen.

Es sei nebenbei bemerkt, daß dieser Sachverhalt die Ideologen des dialektischen Materialismus vor ein schwerwiegendes Problem stellt. Eine der Grundthesen des Diamat ist ja der philosophische Satz von der Erhaltung der Materie und Bewegung. Engels hatte diesen Satz seinerzeit begründet, indem er die physikalischen Sätze von der Erhaltung der Masse, der Energie und des Impulses „philosophisch verallgemeinerte“. Wenn nun der Energiesatz in der allgemeinen Relativitätstheorie aus einem Energieerhaltungssatz zu einem Energievermehrungssatz wird — was wird sich ergeben, wenn man diesen Energievermehrungssatz „philosophisch verallgemeinert“? Das Problem wurde von einem sowjetischen Physiker, J. P. Terlezki, einmal ganz vorsichtig angedeutet, rief aber sofort derartig scharfe Gegenreaktionen der Sowjetideologen hervor, daß seitdem nie mehr davon die Rede war¹⁰.

ENTROPIESATZ UND LEBENSGESCHEHEN

Den Übergang aus unwahrscheinlichen in immer wahrscheinlichere Zustände, den wir im Entropiesatz als Grundrichtung des anorganischen Naturgeschehens kennenlernten, kann man wohl nur als einen gewissen „Verfall“, als ein gewisses „Absinken“ charakterisieren. Wie verhält sich dazu die aufsteigende Entwicklungslinie, die dem organischen Naturgeschehen eigentümlich ist? Konkret gesprochen: Bedeutet das Lebensgeschehen und insbesondere die Entwicklung immer komplizierterer Organismen, die doch immer unwahrscheinlichere Gebilde darstellen, eine Ausnahme vom Entropiesatz?

Eine erschöpfende Antwort auf diese Frage könnte, wenn überhaupt, nur vom Biologischen und Biochemischen her gegeben werden. Eines läßt sich jedoch schon vom Physikalischen her sagen. Es sei zunächst verdeutlicht am Beispiel eines Menschen, der eine komplizierte Maschine zusammensetzt, etwa eines Uhrmachers.

¹⁰ Vgl. S. Müller-Markus, Einstein und die Sowjetphilosophie, Dordrecht 1960, 395 f.

Eine funktionsfähige Uhr ist ein sehr unwahrscheinliches Gebilde. Denn es gibt nur eine einzige Anordnung der Teile der Uhr, bei der die Uhr funktioniert; dagegen gibt es außerordentlich viele verschiedene mögliche Anordnungen der Teile der Uhr, bei denen die Uhr nicht funktioniert (z. B. wenn alle Teile zerstreut auf dem Tisch liegen); in diesem Sinn ist also der Zustand „funktionsfähige Uhr“ viel unwahrscheinlicher als der Zustand „funktionsunfähige Uhr“. Wenn nun ein Uhrmacher den Zustand „funktionsunfähige Uhr“ in den Zustand „funktionsfähige Uhr“ überführt, so überführt er folglich einen wahrscheinlichen in einen sehr unwahrscheinlichen Zustand, und es könnte somit scheinen, als ob hier eine Ausnahme vom Entropiesatz vorliege.

Wir dürfen aber nicht vergessen: Um die Teile der Uhr zusammenzusetzen, muß der Uhrmacher etwas sehen. Damit er etwas sieht, kann er etwa eine Taschenlampe anzünden. (Wenn er sich des Sonnenlichts bedient, gilt von der Sonne mutatis mutandis dasselbe, was im folgenden von der Taschenlampenbatterie gesagt wird.) Eine frische Taschenlampenbatterie befindet sich aber in einem sehr unwahrscheinlichen Zustand, denn es bestehen in ihr große Konzentrationsunterschiede, und sie enthält infolgedessen einen beträchtlichen Vorrat an elektrochemischer Energie, d. h. an von der Wärme verschiedener Energie. Wenn die Lampe brennt, entlädt sich die Batterie, die Konzentrationsunterschiede in ihr gleichen sich aus, die elektrochemische Energie verwandelt sich in Wärmeenergie, und damit geht die Batterie aus einem unwahrscheinlichen in einen wahrscheinlicheren Zustand über. Man kann quantitativ ausrechnen, wie groß die Zunahme an Wahrscheinlichkeit ist, die mit der Entladung der Batterie verbunden ist, und man kann damit den Gewinn an Unwahrscheinlichkeit vergleichen, den die Zusammensetzung der Uhr bedeutet. Es ergibt sich klar und eindeutig: Der Verlust an Unwahrscheinlichkeit, der mit der Entladung der Batterie verbunden ist, ist weitaus größer als der Gewinn an Unwahrscheinlichkeit, den die Zusammensetzung der Uhr bedeutet¹¹.

Ganz ebenso scheint es auch bei den Organismen zu sein, obwohl sich hier die Dinge natürlich nicht so einfach durchschauen lassen wie bei dem Zusammenbau einer Maschine. Es scheint auch bei den Organismen so zu sein, daß die Bildung der hochdifferenzierten Strukturen aus anfänglichen einfacheren Gestalten zwar einen Gewinn an Unwahrscheinlichkeit darstellt, daß dieser Gewinn aber durch einen wenigstens ebenso großen Verlust an Unwahrscheinlichkeit in der umgebenden leblosen Natur kompensiert oder sogar überkompensiert wird. Rein zahlenmäßig gesehen können wir also weder beim Bau einer Maschine durch den Menschen noch auch bei der Entwicklung der Organismen von einer Durchbrechung des Entropiesatzes sprechen.

¹¹ Vgl. L. Brillouin, *Science and Information Theory*, New York 1957, Kap. 12—20.

Aber man muß wohl auch noch einen anderen Gesichtspunkt berücksichtigen. Kehren wir zum Beispiel des Uhrmachers zurück. Wir haben gesehen, daß der Gewinn an Unwahrscheinlichkeit, den der Bau der Uhr darstellt, gleichsam „finanziert“ wird durch den Verlust an Unwahrscheinlichkeit, der mit der Entladung der Taschenlampenbatterie verbunden ist. Was wäre nun, wenn die Taschenlampe brennen würde, ohne daß der Uhrmacher bei ihrem Schein eine Uhr zusammensetzt? Dann ginge das Kapital an Unwahrscheinlichkeit, das in der geladenen Batterie gespeichert war, rettungslos und unwiederbringlich verloren. Durch die Arbeit des Uhrmachers wird also wenigstens ein Teil dieses Kapitals an Unwahrscheinlichkeit gerettet und für weitere Verfügung freigehalten.

Dies als eine erste Bemerkung. Wichtiger aber scheint folgendes: Rein zahlenmäßig gesehen stellt eine frisch geladene Batterie ein viel größeres „Kapital“ an Unwahrscheinlichkeit dar als eine funktionsfähige Taschenuhr. Wenn wir aber nicht nach dem zahlenmäßigen Grad der Unwahrscheinlichkeit fragen, sondern nach dem *Sinngehalt* eines Gebildes, dann ist doch gewiß in der Taschenuhr viel mehr Sinngehalt realisiert als in der geladenen Batterie. Und das gilt ganz allgemein von allem ordnenden und sinnschaffenden Wirken des Menschen: Rein quantitativ gesehen kann der Mensch nie Unwahrscheinlichkeit neu schaffen, sondern er kann nur Unwahrscheinlichkeit aus der umgebenden leblosen Natur entnehmen. Wohl aber vermag der Mensch das Kapital an Unwahrscheinlichkeit, das er der leblosen Natur entnimmt, in solche Formen zu gießen, daß aus bloßer Unwahrscheinlichkeit nun Sinnvolles und Sinnhaftes wird. Das ist das Entscheidende, wodurch das ordnende und sinnschaffende Wirken des Menschen charakterisiert ist. Ähnlich dürfte es vielleicht auch bei der Entwicklung der Organismen sein: Hinsichtlich des rein quantitativen Grades der Unwahrscheinlichkeit stellt die Entwicklung der Organismen keine Ausnahme vom Entropiesatz dar; denn alle Unwahrscheinlichkeit, die sich in den Organismen verkörpert findet, ist einem größeren Kapital an Unwahrscheinlichkeit in der leblosen Natur entnommen. Aber diese Unwahrscheinlichkeit, die der leblosen Natur entnommen wurde, wird in den Organismen gleichsam zum Träger eines Sinnes, und in dieser Hinsicht dürfte die Entwicklung der Organismen etwas darstellen, wozu es in der unbelebten Natur kein Gegenstück gibt.