

# Entropie und Finalität - sinnfreie und sinntragende Unwahrscheinlichkeit

Von Wolfgang Büchel S. J.

Bei einem Vergleich der belebten mit der unbelebten Natur fallen zwei gegenläufige allgemeine Entwicklungslinien in die Augen: Die belebte Natur ist geprägt vom beständigen Übergang einfacherer und niedrigerer Formen zu höheren, differenzierteren und komplizierteren Gebilden, sei es in der Stammesgeschichte, in der Entwicklung des individuellen Organismus oder auf der höchsten Stufe im schöpferisch-gestaltenden Wirken des Menschen. In der unbelebten Natur dagegen finden wir jene Entwicklung, die in dem physikalischen Satz von der Zunahme der Entropie zum Ausdruck kommt und die man etwas pauschal als Ausgleich aller Unterschiede, als Verwischen aller Differenzierungen, als „Versinken im grauen Einerlei“ charakterisieren kann. Physikalisch-mathematisch stellt sich diese Entwicklung als ein beständiger Übergang von unwahrscheinlicheren in wahrscheinlichere Zustände dar, während andererseits im organischen Bereich die höheren Formen wegen ihrer größeren Differenziertheit eine viel unwahrscheinlichere Elementen-Konstellation bedeuten als die einfacheren Formen, aus denen sie sich entwickelten.

Man wird geneigt sein, in der entgegengesetzten Richtung dieser beiden großen Entwicklungslinien einen Ausdruck des Wesensunterschieds zwischen belebter und unbelebter Natur zu erblicken. Diese Auffassung trifft zweifellos im wesentlichen das Rechte. Es kommt aber darauf an, genau zu bestimmen, worin das „Wesentliche“ besteht. Sehr oft wird der Unterschied so formuliert, wie wir es selbst eben taten, daß nämlich in der unbelebten Natur ein Übergang von unwahrscheinlicheren in wahrscheinlichere Zustände stattfindet, während sich in der belebten Natur aus einfacheren Systemen kompliziertere und damit unwahrscheinlichere Konstellationen entwickeln. Auch das typisch menschliche Tun scheint durch das „Erzeugen von Unwahrscheinlichkeit“ charakterisiert; man bedenke, wie höchst unwahrscheinlich etwa die Aufeinanderfolge der Buchstaben eines Buches oder die Anordnung der Teile einer komplizierten Maschine ist.

Gerade für dieses menschliche Tun aber haben in letzter Zeit informationstheoretische Untersuchungen ergeben, daß die Unwahrscheinlichkeit, die in den Erzeugnissen des menschlichen gestaltenden Tuns enthalten ist, nicht vom Menschen gleichsam „geschaffen“ wird,

sondern gänzlich und vollständig von der unbelebten Natur geliefert wird und geliefert werden muß. Was der Mensch von dem Seinen gibt, ist der *Sinngehalt*, der in der Buchstabenfolge eines Buches oder in der Anordnung der Teile einer Maschine enthalten ist; die *Unwahrscheinlichkeit* dagegen, die der „Träger“ dieses Sinngehalts ist, muß der Mensch der unbelebten Natur entnehmen. Der entscheidende Wesenszug des menschlichen gestaltenden Wirkens liegt darin, daß der Mensch der unbelebten Natur einen gewissen „Vorrat“ an sinnfreier Unwahrscheinlichkeit entnimmt und in *sinntragende* Unwahrscheinlichkeit verwandelt, d. h. zum Träger des vom Menschen geschaffenen Sinngehalts macht. Was dies im einzelnen bedeutet, soll der Gegenstand der folgenden Ausführungen sein.

Ob ein gleiches auch für das biologische Entwicklungsgeschehen gilt, läßt sich nicht eindeutig sagen; doch wird eine solche Annahme durch die vielen Analogien, die zwischen dem biologischen Entwicklungsgeschehen und dem gestaltenden Wirken des Menschen bestehen, zumindest sehr nahegelegt. Es erweist sich darum als erforderlich, bei einer philosophischen Betrachtung der Finalität des organischen Geschehens das Hauptgewicht nicht, wie es vielleicht manchmal geschieht, auf die quantitative, zahlenmäßig (im Prinzip) faßbare Unwahrscheinlichkeit komplizierter organischer Systeme zu legen; denn nicht diese Unwahrscheinlichkeit dürfte es sein, die das Leben aus Eigenem gibt, sondern der Sinngehalt, dessen Träger die Unwahrscheinlichkeit ist. Man wird gewiß sagen dürfen, daß es im Grunde schon immer dieser Sinngehalt war, den philosophische Finalitätsbetrachtungen anvisierten; nur schien eben die quantitative Unwahrscheinlichkeit leichter faßbar und nachweisbar zu sein. Die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse zwingen nun dazu, den zahlenmäßig nicht faßbaren Sinngehalt, der den entscheidenden realen Unterschied darstellt, auch zum entscheidenden Gedanken der Beweisführung zu machen.

### 1. Entropie und Wahrscheinlichkeit

Wir wollen im Folgenden darstellen, was gemeint ist mit der Behauptung, daß der Mensch bei seinem schöpferisch-gestaltenden Wirken sinnfreie Unwahrscheinlichkeit aus der unbelebten Natur entnimmt und zum Träger eines von ihm geschaffenen Sinngehalts macht. Wir müssen dazu einige an sich bekannte physikalische Sachverhalte etwas ausführlicher beschreiben; denn nur auf diesem Hintergrund werden die entscheidenden Gedanken in ihrer Bedeutung erkennbar.

Die Physik bringt mit dem Satz von der „Zunahme der Entropie“ die Erfahrungstatsache zum Ausdruck, daß in einem abgeschlossenen System alle von der Wärmeenergie verschiedene Energieformen sich

im Lauf der Zeit mehr und mehr in Wärmeenergie verwandeln — soweit dies überhaupt möglich ist — und daß alle Temperaturunterschiede sich im Lauf der Zeit mehr und mehr ausgleichen. Als Beispiel dafür seien etwa zwei Behälter mit je 1 Liter Wasser betrachtet, bei denen die Wassertemperatur anfänglich  $11^\circ$  bzw.  $9^\circ$  beträgt. Werden die Behälter miteinander in Berührung gebracht und sich selbst überlassen, so beträgt die Wassertemperatur nach einiger Zeit in beiden Behältern  $10^\circ$ . Warum kommt es zu diesem Temperatúrausgleich? Die Physik antwortet seit *L. Boltzmann*: Weil der Zustand der Temperaturgleichheit ungeheuer viel *wahrscheinlicher* ist als der Zustand der Temperaturverschiedenheit.

Um diese Antwort zu verstehen, müssen wir zunächst zwischen dem „Makrozustand“ und dem „Mikrozustand“ des aus unseren beiden Behältern gebildeten physikalischen Systems unterscheiden. Der *Makrozustand* ist gekennzeichnet durch all die Angaben, die man aufgrund einer makrophysikalischen Betrachtung des Systems machen kann; dazu gehört die Angabe des Gewichts des Wassers, seines Volumens, seiner Temperatur. Um den *Mikrozustand* des Systems zu kennzeichnen, müßte man für jedes einzelne Atom und Molekül des Wassers und der Behälter 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. Gestalt und Aufstellung der Behälter sowie Gewicht und Temperatur des Wassers genau vorgeschrieben sind, dann kann dieser so eindeutig festgelegte Makrozustand durch sehr viele verschiedene Anordnungen der Atome des Wassers und der Behälter, also durch sehr viele verschiedene Mikrozustände realisiert werden. Die Physik ist in der Lage, auszurechnen, wie viele verschiedene Mikrozustände zu einem bestimmten Makrozustand gehören. Es ergibt sich die grundlegende Erkenntnis: *Zu dem Makrozustand, bei dem die Temperatur des Wassers in den beiden Behältern gleich ist, gehören ungeheuer viel mehr Mikrozustände als zu einem Makrozustand, bei dem unter im übrigen gleichen Bedingungen die Wassertemperatur in den Behältern verschieden ist.*

Um ein Zahlenbeispiel zu geben: Im Makrozustand I betrage die Wassertemperatur  $11^\circ$  bzw.  $9^\circ$ , die Zahl der zugehörigen Mikrozustände sei  $L$ ; im Makrozustand II betrage die Wassertemperatur  $10,5^\circ$  bzw.  $9,5^\circ$ , die Zahl der zugehörigen Mikrozustände sei  $M$ ; im Makrozustand III sei die Wassertemperatur in beiden Behältern  $10^\circ$ , die Zahl der zugehörigen Mikrozustände sei  $N$ . Dann ist das Verhältnis  $M/L$  eine Zahl mit  $12 \cdot 10^{20}$  Stellen (vor dem Komma), das Ver-

hältnis  $N/M$  eine Zahl mit  $4 \cdot 10^{20}$  Stellen. Denkt man sich diese Zahlen so geschrieben, daß man für je 4 Ziffern 1 cm braucht, so würde man einen Papierstreifen von  $3 \cdot 10^{20}$  cm bzw.  $1 \cdot 10^{20}$  cm Länge benötigen. Der Abstand der Erde von der Sonne beträgt  $1,5 \cdot 10^{15}$  cm; der größere Papierstreifen würde also 100 000 mal von der Erde zur Sonne und wieder zurück reichen.

Was ergibt sich aus diesen ungeheueren Größenunterschieden zwischen den Zahlen  $L$ ,  $M$  und  $N$ ? Nehmen wir an, unser System befinde sich anfänglich im Makrozustand I und in einem der zugehörigen Mikrozustände. Infolge der beständigen Bewegung der Atome ändert sich der Mikrozustand fortwährend. Je weiter die Zeit voranschreitet, desto mehr kann sich das System von seinem anfänglichen Mikrozustand „entfernen“, und nach hinreichend langer Zeit sind nicht nur die  $M$  Mikrozustände, die zu dem Makrozustand II gehören, für das System „erreichbar“ geworden, sondern auch die  $N$  Mikrozustände, die zu dem Makrozustand III gehören. In welchem Mikrozustand wird sich nun das System nach hinreichend langer Zeit tatsächlich befinden?

Genau läßt sich das nicht angeben; aber eines kann man sagen: Da zu dem Makrozustand III so ungeheuer viel mehr Mikrozustände gehören als zu den Makrozuständen I und II und da die zum Makrozustand III gehörigen Mikrozustände für das System (nach hinreichend langer Zeit) ebenso leicht zu „erreichen“ waren wie die zu den Makrozuständen I und II gehörigen Mikrozustände, wird das System sich aller Wahrscheinlichkeit nach in einem der  $N$  Mikrozustände befinden, die zu dem Makrozustand III gehören. Genauer gesagt: Wenn  $w_I$  bzw.  $w_{II}$  bzw.  $w_{III}$  die Wahrscheinlichkeit dafür bedeutet, daß sich das System nach hinreichend langer Zeit in einem der zu den Makrozuständen I bzw. II bzw. III gehörigen Mikrozuständen befindet, so gilt:  $w_I : w_{II} : w_{III} = L : M : N$ .

Nach hinreichend langer Zeit ist es also praktisch gewiß, daß die Wassertemperatur in beiden Gefäßen gleich ist. Natürlich ändert sich auch jetzt der Mikrozustand des Systems beständig; aber es ist praktisch gewiß, daß auch der jeweils neue Mikrozustand einer von den  $N$  Mikrozuständen ist, die zu dem Makrozustand III gehören.

Für physikalische Zwecke hat es sich als förderlich erwiesen, nicht mit den Zahlen  $L$ ,  $M$  und  $N$  selbst zu operieren, sondern mit ihrem Logarithmus. Diesen Logarithmus, multipliziert mit der sogenannten Boltzmann-Konstanten, bezeichnet die Physik als die *Entropie* des Systems im Zustand I, II und III.

Man kann den bisher verfolgten Gedankengang umkehren und sagen: Wenn sich das System unserer zwei Wasserbehälter im Makrozustand III befindet und sich selbst überlassen bleibt, so ist die

Wahrscheinlichkeit dafür, daß das System in den Makrozustand I übergeht, gegeben durch das Verhältnis  $L/N$ . Diese Wahrscheinlichkeit ist ebenso groß bzw. klein wie die Wahrscheinlichkeit dafür, daß etwa ein Affe beim spielerischen Herumtippen auf den Tasten einer Schreibmaschine einen sinnvollen Text von  $10^{21}$  Buchstaben schriebe, was dem Inhalt einer Bibliothek entspräche, deren Bücher, nebeneinander gestellt, von der Erde bis zur Sonne reichen würden. Einer solchen Bibliothek kann man es direkt „ansehen“, daß sie etwas äußerst Unwahrscheinliches darstellt, das niemals durch bloßen Zufall entstehen wird. Dagegen würde sich ein Nicht-Naturwissenschaftler wohl kaum sonderlich wundern, wenn er etwa einen Eimer Wasser sich selbst überlassen hätte und nach einiger Zeit feststellen müßte, daß die anfänglich überall gleiche Wassertemperatur auf der einen Seite gestiegen, auf der anderen Seite gefallen wäre.

Warum diese unterschiedliche Bewertung, wenn doch beide Ereignisse — zufälliges Entstehen einer sinnvollen Buchstabenfolge und zufälliges Entstehen einer Temperaturdifferenz — gleich unwahrscheinlich sind? Es ist zu bedenken, daß das zufällige Entstehen einer Temperaturdifferenz nur dann extrem unwahrscheinlich ist, wenn das betreffende System wirklich streng von der Umgebung abgeschlossen ist<sup>1</sup>. Läßt man aber den Wassereimer in Kontakt mit der Umgebung, so genügt ein wenig Sonnenschein auf der einen und ein wenig Wind auf der anderen Seite, um im Wasser eine Temperaturdifferenz zu erzeugen. Dem Affen dagegen, der auf seiner Schreibmaschine spielt, ist auch dann nicht weitergeholfen, wenn er Kontakt mit seiner Umgebung aufnehmen darf — es sei denn, daß er mit einer so speziellen „Umgebung“ Kontakt findet, wie sie die lenkende Hand eines Menschen bedeutet.

Man kann den Unterschied auch so formulieren: Temperaturdifferenzen begegnen uns in der Natur auf Schritt und Tritt, und darum erwecken sie durchaus nicht den Eindruck von etwas „Unwahrscheinlichem“; sinnvolle Zeichenkombinationen dagegen begegnen uns in der — unbelebten — Natur nirgends, und daher rührt ihr Seltenheitswert.

Doch gerade die Tatsache, daß wir in der Natur auf Schritt und Tritt Temperaturdifferenzen begegnen, muß bei einigem Nachdenken als sehr merkwürdig und erstaunlich erscheinen. Versetzen wir uns einmal in die folgende Situation: Von der Welt, in der wir leben, sei uns nicht ihre tatsächliche Struktur bekannt, sondern nur die Art und Anzahl der Elementarteilchen, aus denen sie besteht, die Summe der in ihr enthaltenen Energien und die Gesamtheit aller elementaren

<sup>1</sup> Es wird natürlich vorausgesetzt, daß das System keine verborgenen Energiequellen, etwa radioaktive Atome, besitzt.

Naturgesetze (d. h. der Naturgesetze, durch welche die Veränderungen des *Mikrozustands* der Welt bestimmt werden). Auf dieser Basis sollten wir Überlegungen darüber anstellen, welches die tatsächliche Struktur der Welt sei.

Wir würden zunächst bedenken: Die uns gegebenen „Bausteine“ lassen sich zu den verschiedensten Mikrozuständen zusammensetzen, deren Eigenschaften sich im einzelnen kaum übersehen lassen, von denen wir aber eines sagen können: Die ganz überwältigende Mehrzahl aller Mikrozustände ergibt eine Welt, in welcher, makroskopisch gesehen, überall Temperaturgleichheit herrscht. Aus der Form der uns angegebenen elementaren Naturgesetze können wir weiterhin erkennen, daß durch diese Gesetze kein Mikrozustand vor einem anderen „bevorzugt“ wird, daß also alle Mikrozustände gleich gut „möglich“ sind. Wenn aber alle Mikrozustände gleichmöglich sind und wenn die überwältigende Mehrheit aller Mikrozustände zu einem Makrozustand ohne Temperaturdifferenzen führt, dann müßten wir mit völliger Gewißheit erwarten, daß der tatsächliche Zustand unserer Welt keine Temperaturdifferenzen aufweist. Es müßte uns infolgedessen als das größte Wunder erscheinen, daß sich in unserer Welt nicht nur hier und da Temperaturdifferenzen finden, sondern daß diese geradezu die Regel darstellen. Auf der anderen Seite erwiesen sich die Überlegungen, die wir angestellt hatten, insofern als zutreffend, als die Welt sich tatsächlich unablässig dem Zustand nähert, den wir erwartet hatten.

Es ergibt sich also: Die Tatsache, daß wir in der Natur auf Schritt und Tritt Temperaturdifferenzen usw. vorfinden, darf uns nicht dazu verleiten, diese als etwas „Selbstverständliches“, das keiner weiteren Erklärung mehr bedürfte, aufzufassen. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie in der belebten Natur. In der belebten Natur finden sich äußerst zweckmäßige Strukturen in einer solchen Überfülle, daß diese Häufigkeit dazu verleiten könnte, die Existenz derartiger Strukturen als etwas „Selbstverständliches“ zu betrachten, das keiner weiteren Erklärung bedürfte. Dennoch erkennt sogar die extrem evolutionistische Auffassung der organismischen Zweckmäßigkeit an, daß diese ein echtes Problem darstellt, welches eine Erklärung fordert, sei es auch die Erklärung durch Mutation und Selektion. In gleicher Weise verlangt die Tatsache, daß sich unser Kosmos mit seinen ungeheueren Temperaturdifferenzen usw. in einem extrem unwahrscheinlichen Zustand befindet, eine Erörterung und Erklärung<sup>2</sup>.

Im gegenwärtigen Problemzusammenhang können wir uns jedoch mit der Feststellung begnügen, daß die Temperaturdifferenzen usw. trotz ihrer scheinbaren „Selbstverständlichkeit“ einen echten „Vorrat

<sup>2</sup> Vgl. dazu W. Büchel in: *Philosophia Naturalis* 6 (1960) 168.

an Unwahrscheinlichkeit“ darstellen. Um diesen Gesichtspunkt noch deutlicher zum Ausdruck zu bringen, empfiehlt es sich, im Anschluß an L. Brillouin<sup>3</sup> den Begriff der *Negentropie* (= „negative Entropie“) einzuführen. Unter der Negentropie eines isolierten Systems ist jener Zuwachs an Entropie verstanden, den das System erfährt, wenn es aus seinem gegenwärtigen Zustand in den Zustand maximal möglicher Entropie, also maximalen Ausgleichs aller Temperaturdifferenzen usw. übergeht. Die Negentropie des Systems im gegenwärtigen Zustand ist also einfach die Differenz zwischen der maximal erreichbaren Entropie und der Entropie des gegenwärtigen Zustands. Je größer die Negentropie, desto größer der in dem System enthaltene „Vorrat an Unwahrscheinlichkeit“. Um zum Ausdruck zu bringen, daß diese Unwahrscheinlichkeit in der Form von Temperaturdifferenzen, in Gestalt des Vorhandenseins nicht-thermischer Energien usw. auftritt, wollen wir von *thermodynamischer* Negentropie sprechen.

## 2. Sinnfreie und sinntragende Unwahrscheinlichkeit

Um den Anschluß unserer bisherigen Überlegungen an die Betrachtung des schöpferisch-gestaltenden Wirkens des Menschen herzustellen, müssen wir für dieses eine entsprechende Terminologie einführen. Betrachten wir dazu als typisches Beispiel eines Erzeugnisses des gestaltenden Wirkens des Menschen einen auf Papier geschriebenen sinnvollen Text. Die Anzahl der Buchstaben des Textes sei  $r$ . Eine Reihe von  $r$  aufeinanderfolgenden Buchstaben kann, wenn *jede beliebige* Buchstabenkombination zugelassen ist — also auch eine solche, die überhaupt keinen Sinn ergibt —, auf  $26^r$  verschiedene Weisen hergestellt werden. Im Anschluß an die bisherige Terminologie können wir das so ausdrücken: Der „Makrozustand“: „*beliebige* Kombination von  $r$  Buchstaben“, kann durch  $26^r$  verschiedene „Mikrozustände“, d. h. durch  $26^r$  verschiedene Buchstabenfolgen realisiert werden. Dagegen kann der „Makrozustand“: „*sinnvolle* Kombination von  $r$  Buchstaben“, durch wesentlich weniger „Mikrozustände“ realisiert werden (von Kunstsprachen sei hier abgesehen); und wenn als „Makrozustand“ ein *bestimmter* Text vorgeschrieben ist, kann dieser nur durch einen einzigen „Mikrozustand“ realisiert werden (es sei denn, daß man die Möglichkeit verschiedener Schreibweisen, verschiedener Zeichensetzung usw. zuläßt).

Es empfiehlt sich nun, wieder den Logarithmus der Anzahl der Mikrozustände zu bilden, durch welche der Makrozustand „beliebige Kombination von  $r$  Buchstaben“ bzw. der als Makrozustand vorgeschriebene sinnvolle Text realisiert werden kann, und die Differenz dieser beiden Logarithmen, multipliziert mit der Boltzmann-Kon-

<sup>3</sup> L. Brillouin, *Science and Information-Theory*, New York 1956.

stanten, als *strukturelle Negentropie* des sinnvollen Textes von  $r$  Buchstaben zu bezeichnen<sup>4</sup>.

In ähnlicher Weise kann man bei einer Maschine die Makrozustände: „beliebige Zusammensetzung der Einzelteile“, und „funktionsfähige Zusammensetzung der Einzelteile“ unterscheiden und so die strukturelle Negentropie der funktionsfähigen Maschine bestimmen. Die Detailfragen, die dabei auftreten, z. B. wann eine Kombination der Einzelteile als von einer anderen Kombination „verschieden“, als mit einer anderen Kombination „gleichmöglich“ usw. anzusehen sei, brauchen in unserem Zusammenhang nicht zu interessieren; sie stellen bekannte Probleme der Wahrscheinlichkeits- und Informationstheorie dar. Dort wird auch erklärt, wie die strukturelle Negentropie zu bestimmen ist, die in der speziellen Formgebung eines Einzelteils enthalten ist, usw. In unserem Zusammenhang ist nur eines wesentlich: Durch das gestaltende Wirken des Menschen wird in der materiellen unbelebten Welt strukturelle Negentropie erzeugt.

Nun gilt der entscheidende Satz: *Wenn durch das gestaltende Wirken des Menschen ein bestimmter Betrag an struktureller Negentropie erzeugt wird, so ist dies nur dadurch möglich, daß gleichzeitig die thermodynamische Negentropie der materiellen Welt um mindestens den gleichen Betrag abnimmt*<sup>5</sup>. Strukturelle Negentropie kann also nur „auf Kosten“ thermodynamischer Negentropie produziert werden. Das gilt natürlich nicht nur für den Menschen, sondern erst recht für jede Maschine, die irgendwie das gestaltende Wirken des Menschen nachahmt.

Diese Erkenntnis hilft, die Eigenart des gestaltenden und ordnungschaffenden menschlichen Wirkens besser zu verstehen: Es besteht darin, daß der unbelebten Natur ein Vorrat an *sinnfreier* Unwahrscheinlichkeit, d. h. an *thermodynamischer* Negentropie, entnommen und in *sinntragende* Unwahrscheinlichkeit, d. h. in *strukturelle* Negentropie, *umgewandelt* wird. Das bedeutet auf der einen Seite eine Beschränkung: In quantitativer Hinsicht, d. h. in jener Hinsicht, die durch den Begriff der Negentropie erfaßt wird, ist der Mensch nicht, wie man bisher wohl allgemein annahm, fähig, Unwahrscheinlichkeit neu zu schaffen. Diese Beschränkung hängt damit zusammen (vgl. die Beispiele im Anhang), daß der Mensch „Geist *in Welt*“ ist, d. h. Geist,

<sup>4</sup> Der Ausdruck „strukturelle Negentropie“ stammt von L. Brillouin; das Gemeinte ist sachlich identisch mit dem, was in der Informationstheorie unter der „Entropie“ einer Nachrichtenquelle, Versuchsanordnung usw. verstanden wird. — Auf die Auswirkungen von Korrelationen zwischen Buchstaben usw. brauchen wir in unserem Zusammenhang nicht einzugehen.

<sup>5</sup> Der Beweis dieses Satzes wird für zwei spezielle Fälle im Anhang gegeben; für den allgemeineren Beweis siehe L. Brillouin a. a. O. (Anm. 3).

der den von ihm entworfenen Sinnstrukturen nur durch entsprechende Kombination passender materieller Elemente „Wirklichkeit“ zu verleihen vermag. Gewiß wußte man schon immer, daß der Mensch der materiellen Welt den „Stoff“ entnehmen muß, dem er die „Form“ seiner Ideen aufprägt; doch man hätte wohl kaum angenommen, daß die Unwahrscheinlichkeit der Erzeugnisse des menschlichen Wirkens zum „Stoff“ und nicht zur „Form“ gehört. Auf der anderen Seite bleibt aber bestehen, daß der Mensch als Geistwesen *sinnhafte* Strukturen zu entwerfen, also *Sinngehalte* neu zu *schaffen* und dadurch sinnfreie Unwahrscheinlichkeit in sinntragende umzuwandeln vermag. Eine philosophische Analyse des gestaltenden menschlichen Wirkens muß schon aus diesem Grunde die Sinnfrage und nicht die Frage nach der Unwahrscheinlichkeit der hervorgebrachten Erzeugnisse in den Vordergrund stellen.

Was dies unter anderem besagt, sei an einem Beispiel verdeutlicht: Man argumentiert vielfach: „Wenn sich am Meeresstrand eine sinnvolle Buchstabenreihe in den Sand eingeritzt findet, so ist daraus zu schließen, daß hier ein Mensch am Werk gewesen ist; denn die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich die Sandkörner durch reinen Zufall in dieser Weise anordnen, ist extrem klein.“ Diese Schlußweise ist insofern unvollständig, als für das Zustandekommen der Buchstabenreihe nicht nur die Anwesenheit eines Menschen erforderlich ist, sondern auch das Vorhandensein eines entsprechenden Vorrats an sinnfreier Unwahrscheinlichkeit, d. h. eine entsprechende thermodynamische Negentropie in der unbelebten Natur. Dieses letzte ist beim Walten reinen Zufalls ebenso extrem unwahrscheinlich wie die zufällige Entstehung der Buchstabenreihe (vgl. oben die Überlegungen über die Unwahrscheinlichkeit des gegenwärtigen Zustands der Welt); es erfordert also seinerseits die Annahme eines „Antizufallsfaktors“. Wenn man aber schon einmal einen Antizufallsfaktor einführen muß, dann würde eine rein wahrheitstheoretische Betrachtungsweise eher zu der Annahme führen, daß dieser Antizufallsfaktor direkt sinntragende Unwahrscheinlichkeit produziert habe und nicht sinnfreie Unwahrscheinlichkeit, die erst von einem Menschen in sinntragende Unwahrscheinlichkeit umgewandelt wurde; denn es ist allgemeines Prinzip der Hypothesenbildung, *ceteris paribus* der einheitlicheren Erklärung den Vorzug zu geben, und die Annahme eines einzigen Antizufallsfaktors böte eine einheitlichere Erklärung als die Annahme der Kombination Antizufallsfaktor + Mensch<sup>6</sup>. Erst wenn man das *Erfahrungswissen* hinzunimmt, daß der in der unbelebten Natur wirksam gewesene Antizufallsfaktor nur sinnfreie Unwah-

<sup>6</sup> Man kann nicht einwenden, das Prinzip vom hinreichenden Grund verlange eine *hinreichende* Ursache, also einen Menschen; denn solange man über die Natur

scheinlichkeit produziert hat, ist der Schluß auf menschliches Wirken gerechtfertigt.

Es ergibt sich also: Die Entscheidung gegen die Annahme bloßen Zufalls erfolgt zwar aufgrund der Unwahrscheinlichkeit; *die Entscheidung für die Annahme eines menschlichen Wirkens ist jedoch lediglich aufgrund der Sinnhaftigkeit möglich.*

Man könnte die Frage aufwerfen, ob der Begriff der Sinnhaftigkeit nicht ein subjektives Element enthalte; man könnte darauf hinweisen, daß ein verschlüsselter Text für den, der den Schlüssel kennt, sinnvoll, für einen anderen dagegen sinnlos ist. Das ist insofern richtig, als bei jeder Übertragung eines geistigen Sinngehalts in materielle Ausdrucksformen eine gewisse „Konvention“ über die Art der Ausdrucksweise mitspielt. Die Verhältnisse werden eindeutig, wenn die Sinnhaftigkeit in *Zweckmäßigkeit* besteht; daß eine bestimmte Anordnung von Metallteilen usw. den Empfang von Radiowellen ermöglicht, andere Anordnungen dagegen nicht, ist eine objektive Gegebenheit. — Es ist in diesem Zusammenhang interessant, zu bemerken, daß die mathematisch-physikalische sogenannte *Informationstheorie*, die eine Theorie der Nachrichtenübertragung aufzubauen versucht, bis jetzt von dem Begriff der „Nachricht“ nur das quantitative Element der strukturellen Negentropie in den Griff bekommen konnte, nicht dagegen den Aspekt des Sinngehalts, mag es sich dabei um den mehr subjektiv gefärbten Sinngehalt handeln, der auf einer Konvention über die Wahl der Ausdrucksformen beruht, oder um den „objektiven“ Sinngehalt, der in der Funktionsfähigkeit einer bestimmten Kombination materieller Elemente besteht<sup>7</sup>. Die Informationstheorie hat zwar manche Beziehungen zur *Kybernetik*, welche als Wissenschaft von der Steuerung und Kontrolle materieller Systeme ausdrücklich die Frage nach der Funktionsfähigkeit einer Apparatur stellt; aber in der Kybernetik spielt dann der quantitative Begriff der strukturellen Negentropie höchstens gelegentlich eine Rolle<sup>8</sup>.

Wir betrachteten bis jetzt den Fall, daß sinntragende Strukturen vom Menschen *erzeugt* werden. Doch auch der umgekehrte Vorgang, das *Erkennen* sinntragender Strukturen, speziell also das *Lesen* einer Schrift, ist notwendig mit einem Verbrauch thermodynamischer Negentropie verbunden, und dieser Verbrauch ist auch hier mindestens ebenso groß wie die strukturelle Negentropie der erkannten Struktur.

des Antizufallsfaktors nichts weiß, muß die Möglichkeit offengelassen werden, daß dieser eine hinreichende Ursache darstellt.

<sup>7</sup> Vgl. dazu Brillouin a. a. O. Kap. 20, Nr. 5.

<sup>8</sup> Gemeint ist hier natürlich die strukturelle Negentropie, die in dem Konstruktionschema einer Maschine enthalten ist, nicht die Frage nach der Kapazität eines Informationsspeichers.

Der Grund dafür ist leicht ersichtlich: Der Mensch als „Geist in Welt“ kann materielle Strukturen nur durch Sinneswahrnehmung erkennen. Der Vorgang der Sinneswahrnehmung beginnt aber damit, daß in dem betreffenden Sinnesorgan ein materielles „Abbild“ des zu erkennenden Gegenstands erzeugt wird, d. h., daß ein Zustand des Sinnesorgans erzeugt wird, dem eine gewisse strukturelle Negentropie zukommt, und dazu ist eben wie auch sonst eine gewisse thermodynamische Negentropie erforderlich. Das „Bild“, das im Sinnesorgan erzeugt wird, kann „unscharf“ sein, d. h., seine strukturelle Negentropie kann kleiner sein als die des Gegenstands selbst; dann wird zur Erzeugung dieses unscharfen Bildes weniger thermodynamische Negentropie verbraucht, aber dafür ist auch der Erkenntnisgehalt, der in das Bewußtsein des Wahrnehmenden gelangt, entsprechend geringer. *Jeder Erkenntnisgewinn, der durch Sinneswahrnehmung erfolgt, muß mit einem entsprechenden Quantum thermodynamischer Negentropie bezahlt werden.*

Daß der Zusammenhang zwischen struktureller und thermodynamischer Negentropie in der Alltagserfahrung überhaupt nicht wahrgenommen wird, hat seinen Grund in den obwaltenden ungeheueren Zahlenverhältnissen: Die thermodynamische Negentropie, die in dem Temperaturunterschied zwischen 1 Liter Wasser von 11° und 1 Liter Wasser von 9° enthalten ist, kann die sinnfreie Unwahrscheinlichkeit für das Schreiben oder Lesen einer Bibliothek liefern, deren Bücher, nebeneinandergestellt, von der Erde bis zur Sonne reichen würden! Dieses extreme Zahlenverhältnis ist darin begründet, daß schon in einer Nadelspitze so ungeheuer viele Atome enthalten sind. Lägen die Zahlenverhältnisse anders, würde etwa die oben angegebene thermodynamische Negentropie nur die sinnfreie Unwahrscheinlichkeit für eine einzige Schriftzeile liefern, so müßte der Mensch auf Schritt und Tritt erleben, wie er gerade auch in seinen geistgeprägten Umweltsbeziehungen auf den Unwahrscheinlichkeitsvorrat in der leblosen Natur angewiesen ist. Die Dinge liegen hier ähnlich wie in der Relativitätstheorie und Quantenphysik, wo ebenfalls Zusammenhänge, die wohl auch in philosophischer Hinsicht nicht bedeutungslos sind, durch die ungeheueren Zahlenverhältnisse verdeckt werden und sich nur eingehender Detailuntersuchung erschließen. Man kann darin eine Art „Anpassung“ des organischen Lebens erblicken: Wenn die Auswirkungen der Relativitätstheorie, der Quantenphysik und der Abhängigkeit von thermodynamischer Negentropie im Alltagsleben spürbar wären, wären Erkennen und Handeln bedeutend erschwert<sup>9</sup>.

Besteht der Zusammenhang zwischen struktureller und thermodynamischer Negentropie, der sich bei dem Wirken des Menschen

<sup>9</sup> Vgl. O. Costa de Beauregard, in: RevIntPh 62 (1962) 1, bes. 14 ff.

und der vom Menschen geschaffenen Maschinen aufweisen läßt, auch im Bereich des *physiologisch-vegetativen* Geschehens, beim stammesgeschichtlichen Evolutionsgeschehen und bei der Entstehung und Entwicklung des individuellen Organismus? Da dieser ganze Komplex noch weithin ungeklärt ist, kann man nur Vermutungen anstellen. Gegen einen Zusammenhang zwischen struktureller und thermodynamischer Negentropie könnte auf den ersten Blick die Tatsache zu sprechen scheinen, daß der Begriff der thermodynamischen Negentropie wesentlich *makrophysikalischer* Natur ist; er beruht ja auf der makrophysikalischen Nichtunterscheidbarkeit von Mikrozuständen, die, auf atomarer und molekularer Ebene betrachtet, sehr verschieden sein können. Da sich nun entscheidende Lebensvorgänge gerade auf makromolekularer Ebene abzuspielen scheinen, könnte man die Frage aufwerfen, wie auf dieser Ebene überhaupt der Verbrauch thermodynamischer Negentropie zu definieren sein sollte.

Diese Frage dürfte jedoch kein besonderes Problem darstellen. Es genügt z. B., wenn bei der Bildung einer komplexen molekularen Struktur ein Atom frei wird, das mit großer Geschwindigkeit, also mit großer kinetischer Energie, in die umgebende Zellflüssigkeit hineinfliegt<sup>10</sup>. Bei den Zusammenstößen mit den Molekülen der Zellflüssigkeit wird dieses Atom den größten Teil seiner Energie an die anderen Atome abgeben, was (bei „elastischen“ Zusammenstößen) zu einer — wenn auch kleinen — Erhöhung der mittleren Energie der ungeordneten Bewegung der Moleküle, d. h. zu einer Erhöhung der Temperatur der Zellflüssigkeit führt. Es verwandelt sich also kinetische Energie in Wärmeenergie, und das bedeutet einen Verbrauch von thermodynamischer Negentropie. — Wie eng Mikro- und Makrophysik zusammenhängen können, zeigt auch folgendes Beispiel: Der Zerfall eines radioaktiven Atomkerns stellt einen Prozeß dar, der nach allem, was wir wissen, an sich auch in der umgekehrten Richtung, d. h. als Aufbau des Kerns aus seinen Zerfallsprodukten, ablaufen könnte. Tatsächlich läuft der Prozeß aber nur als Zerfallsprozeß ab, weil der Zerfallsprozeß mit Entropiezunahme, der Aufbau prozeß mit Entropieabnahme verbunden ist: Der *Makrozustand* „ein unzerfallener Atomkern irgendwo in einem Behälter“ kann durch viel weniger Mikrozustände realisiert werden als der *Makrozustand* „die Zerfallsprodukte irgendwo im gleichen Behälter“<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Die Energie des Atoms kann aus der Bindungsenergie stammen, die frei wird, wenn zwei Teile eines Makromoleküls, die irgendwie in Berührung miteinander gebracht wurden, sich durch eine chemische Reaktion „aneinanderhängen“. Diese Bindungsenergie muß groß sein gegenüber der Energie der thermischen Bewegung, weil sonst die Teile des Moleküls unter dem Einfluß der thermischen Bewegung wieder auseinanderbrächen.

<sup>11</sup> Vgl. O. Costa de Beauregard, *Théorie Synthétique de la Relativité Restreinte et des Quanta*, Paris 1957, 171 ff.

Wie die Verhältnisse im physiologisch-vegetativen Bereich wirklich liegen, kann nur die physiologische Forschung lehren. Da sich aber bis jetzt der Satz von der Zunahme der Entropie im physiologischen Bereich in allen überprüfbaren Fällen als gültig erwiesen hat<sup>12</sup>, liegt die Vermutung nahe, daß auch der Zusammenhang zwischen struktureller und thermodynamischer Negentropie, der eigentlich nur eine Folgerung aus dem Satz von der Zunahme der Entropie darstellt, im physiologischen Bereich nicht aufgehoben ist.

Hingewiesen sei noch auf einen allgemeineren naturphilosophischen Aspekt des Zusammenhangs zwischen struktureller und thermodynamischer Negentropie: Bekanntlich hat *F. Engels* in der „Dialektik der Natur“ aus den Prinzipien des Dialektischen Materialismus die Folgerung abgeleitet, die Physik werde einmal Vorgänge entdecken, die dem Satz von der Zunahme der Entropie widersprechen<sup>13</sup>. Da die Physik derartige Vorgänge bis jetzt nicht entdeckt hat, hat *W. Krah*, ein Vertreter des Dialektischen Materialismus, versucht, wenigstens die Denkmöglichkeit solcher Vorgänge positiv aufzuweisen, und hat dazu eine Apparatur ersonnen, die auf den ersten Blick tatsächlich in der Lage zu sein scheint, die thermodynamische Entropie des Systems Apparatur + Umgebung zu vermindern. Was Krah jedoch nicht berücksichtigte, war die Tatsache, daß bei der Bedienung der Apparatur strukturelle Negentropie in die Apparatur „hineinsteckt“ werden muß, und zwar ist der aufzuwendende Betrag an struktureller Negentropie stets größer als die von der Apparatur produzierte thermodynamische Negentropie. Die strukturelle Negentropie kann aber letzten Endes nur um den Preis thermodynamischer Negentropie erzeugt werden, und so ergibt sich, daß auch durch die von Krah ersonnene Apparatur der Satz von der Zunahme der thermodynamischen Entropie nicht außer Kraft gesetzt werden kann<sup>14</sup>.

#### Anhang: Signal und thermische Schwankung

Im Folgenden soll an zwei absichtlich sehr schematischen Beispielen verdeutlicht werden, worin die Zunahme der thermodynamischen Entropie beim Vorgang des Schreibens und Lesens begründet ist.

Wir denken uns zunächst eine elektrische Schreibmaschine, die nur eine einzige Taste besitzen soll. In einer kleinen Sichtöffnung erscheinen jeweils nacheinander alle Buchstaben des Alphabets, und wenn der gewünschte Buchstabe erscheint, wird die Taste kurz niedergedrückt

<sup>12</sup> Vgl. z. B. *W. Brittin* u. *G. Gamow* in: *Proceed. Nat. Acad. Scienc.* 47 (1961) 724.

<sup>13</sup> *F. Engels*, *Dialektik der Natur*, Berlin 31955, 303 f.

<sup>14</sup> *W. Krah* in: *Wissenschaftl. Zschr. d. Techn. Hochschule Dresden* 7 (1957/58) 196. Zur Kritik vgl. *W. Büchel* in: *Physikal. Blätt.* 18 (1962) 400, hier 403.

und dadurch ein Stromkreis geschlossen, der über einen Magneten usw. den Druck des betreffenden Buchstabens bewirkt. Wir fragen, welche Zunahme der thermodynamischen Entropie mit dem bloßen Drücken der Taste, also mit dem bloßen „Signal-Geben“, verbunden ist.

Wie kommt es überhaupt zu einer Entropiezunahme beim Tastendruck? Es muß dafür gesorgt sein, daß die Taste nicht „von selbst“ in die Kontaktstellung geht, sondern nur, wenn sie vom Schreiber gedrückt wird. Dies wird durch ein „Arretierungsverfahren“ bewirkt, welches im allgemeinen darin besteht, daß die Taste durch eine Feder in der Ruhelage festgehalten wird. Zum Drücken der Taste muß also eine gewisse mechanische Energie aufgewandt werden, und wenn man die Taste wieder losläßt und die Taste beim Zurückschnellen gegen die Halterung in der Ruhelage prallt, verwandelt sich die aufgewandte mechanische Energie in Wärmeenergie. Eine Verwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie stellt aber eine Zunahme der thermodynamischen Entropie dar.

Man kann natürlich ein kleines Gewichtstück auf die zurückgehende Taste legen, so daß ein Teil der aufgewandten mechanischen Energie von der zurückgehenden Taste zur Hebung des Gewichts verwandt, also nicht in Wärmeenergie umgewandelt wird. Aber auf diese Weise läßt sich nicht die *ganze* aufgewandte Energie zurückgewinnen. Denn entweder hält das Gewichtstück dem Federdruck genau das Gleichgewicht, und dann bewegt sich die Taste überhaupt nicht, sondern bleibt in der Kontaktstellung; oder das Gewichtstück hält dem Federdruck nicht genau das Gleichgewicht, und dann bewegt sich die Taste, aber es wird nicht so viel Energie zurückgewonnen, wie beim Niederdrücken aufgewandt werden mußte.

Man kann auch auf andere Weise versuchen, den Aufwand an mechanischer Energie zu verringern, z. B. indem man nur eine ganz schwache Feder verwendet, um die Taste in der Ruhelage festzuhalten. Man stößt aber dabei schließlich an eine grundsätzliche Grenze, die bei den extrem empfindlichen Apparaten, wie sie in der modernen Nachrichtentechnik verwendet werden, auch praktische Bedeutung gewinnen kann. Es ist nämlich zu bedenken, daß sich die Atome und Moleküle in der Taste und der umgebenden Luft in beständiger ungeordneter Bewegung befinden, nämlich in jener ungeordneten Bewegung, in der das „Wesen“ der Wärme besteht. Infolgedessen könnten möglicherweise alle Atome usw. einmal gerade so schwingen, daß die Taste „von selbst“ in die Kontaktstellung ginge. Die Wahrscheinlichkeit für etwas Derartiges ist, wie man auch ohne physikalische Rechnung leicht verstehen kann, um so größer, je weniger Energie zur Überwindung der Arretierungsvorrichtung aufgewandt werden muß

und je heftiger die Wärmebewegung der Atome, d. h., je höher die Temperatur ist. Wenn die Energie, die ein einzelnes Atom im Mittel aufgrund seiner Wärmebewegung besitzt, von gleicher Größenordnung ist wie die zur Überwindung der Tastenarretierung erforderliche Energie, dann wird das „spontane“ Kontaktgeben der Taste zur realen Möglichkeit, und die Taste wird als Signalgeber unbrauchbar. Damit ist eine untere Grenze gegeben für den Energiebetrag, der zur Überwindung der Arretierung aufgewandt werden muß (bzw. für den Energiebetrag, der nicht wieder zurückgewonnen werden kann), und somit auch für die Entropiezunahme, die eintritt, wenn diese Energie in Wärme verwandelt wird.

Man kann den Mindestbetrag an aufzuwendender Energie natürlich verkleinern, indem man die Temperatur der Taste und der umgebenden Luft senkt. Dadurch wird jedoch die Entropiezunahme nicht verringert. Denn die Entropiezunahme ist, wie die Physik zeigt, proportional dem Energiebetrag, der in Wärme verwandelt wird, und *umgekehrt proportional der Temperatur*; wenn also bei niedriger Temperatur wenig Energie in Wärme verwandelt wird, ist die Entropiezunahme doch ebenso groß, wie wenn bei hoher Temperatur viel Energie in Wärme verwandelt wird.

Soweit die Zunahme der thermodynamischen Entropie, also der Verbrauch an thermodynamischer Negentropie. Welchen Gewinn an *struktureller* Negentropie können wir durch die Betätigung der Taste erreichen?

Die strukturelle Negentropie eines sinnvollen Textes von  $r$  Buchstaben hatten wir früher wie folgt definiert: Es sei  $x$  die Anzahl der möglichen beliebigen Kombinationen von  $r$  Buchstaben, und  $y$  sei die Anzahl jener Buchstabenkombinationen, die den vorgeschriebenen sinnvollen Text ergeben; dann ist die strukturelle Negentropie des sinnvollen Textes proportional der Differenz zwischen dem Logarithmus von  $x$  und dem Logarithmus von  $y$ .  $y$  ist im allgemeinen gleich 1, also  $\text{Log}(y) = 0$ .  $x$  hängt davon ab, wie viele verschiedene Arten von Buchstaben oder Zeichen für die Kombination zur Verfügung stehen. Stehen  $m$  verschiedene Arten von Buchstaben oder Zeichen für die Kombination zur Verfügung, so gilt  $x = m^r$  und darum  $\text{Log}(x) = r \cdot \text{Log}(m)$ . Dies, noch multipliziert mit der Boltzmann-Konstanten, ist die strukturelle Negentropie des sinnvollen Textes; sie ist also um so größer, je größer  $r$  und  $m$  sind.

Am Beispiel unserer Schreibmaschine läßt sich nun zeigen, daß auch die aufzuwendende thermodynamische Negentropie um so größer ist, je größer  $r$  und  $m$  sind. Zunächst ist klar, daß der Aufwand an thermodynamischer Negentropie proportional zu  $r$  ist; denn die Zahl  $r$  gibt an, wie oft die Taste gedrückt wird, und bei jedem ein-

zelen Tastendruck wird der gleiche Betrag an thermodynamischer Negentropie verbraucht.

Daß der Aufwand an thermodynamischer Negentropie ansteigt, wenn  $m$  größer wird, zeigt die folgende Überlegung: Unsere Schreibmaschine ist so konstruiert, daß jeweils alle  $m$  Zeichen nacheinander in einem Sichtfenster erscheinen und bei dem gewünschten Zeichen die Taste gedrückt wird. Es kommt also im Durchschnitt auf  $m$  „gezeigte“ Zeichen 1 „getastetes“ Zeichen; die relative Häufigkeit der getasteten Zeichen unter den gezeigten Zeichen ist  $1/m$ .

Der letzte Satz bezieht sich auf die *absichtlich* getasteten Zeichen. Wir müssen aber auch die relative Häufigkeit derjenigen Zeichen berücksichtigen, die getastet werden, indem die Taste, wie früher beschrieben, infolge einer „thermischen Schwankung“ *von selbst* in die Kontaktstellung geht. Ist  $w$  die Wahrscheinlichkeit für ein solches „spontanes“ Kontaktgeben, dann ist die relative Häufigkeit der spontan getasteten Zeichen unter den gezeigten Zeichen gleich  $w$ . Damit die Taste als Signalegeber brauchbar ist, muß die relative Häufigkeit der spontan getasteten Zeichen klein sein gegenüber der relativen Häufigkeit der absichtlich getasteten Zeichen, es muß also  $w$  klein sein gegenüber  $1/m$ . Je größer  $m$  ist, desto kleiner muß  $w$  werden, und damit  $w$  kleiner wird, muß, wie oben ausgeführt, die für die Überwindung der Tastenarretierung erforderliche Energie erhöht oder die Temperatur gesenkt werden. Eine Erhöhung der Arretierungsenergie bzw. eine Senkung der Temperatur bedeutet aber, wie früher dargelegt, eine Vergrößerung des mit einem Tastendruck verbundenen Zuwachses an thermodynamischer Entropie.

Je größer die erzeugte strukturelle Negentropie, desto größer also der Verbrauch an thermodynamischer Negentropie.

Für den interessierten Leser seien die quantitativen Beziehungen kurz zusammengestellt: Ist  $dS$  die Zunahme an thermodynamischer Entropie beim Schreiben eines aus  $r$  Buchstaben bestehenden Textes,  $E$  die Arretierungsenergie und  $T$  die absolute Temperatur, so gilt:  $dS = r \cdot E/T$ . Für  $w$  gilt nach der Boltzmann-Statistik:  $w \approx \exp[-E/(k \cdot T)]$  ( $k =$  Boltzmann-Konstante). Aus  $w \ll 1/m$  folgt:  $E/(k \cdot T) > \ln(m)$ . Nun ist die strukturelle Negentropie des sinnvollen Textes gemäß dem Früheren gegeben durch  $dS' = k \cdot r \cdot \ln(m)$ , und somit ergibt sich:  $dS > dS'$ .

Zu demselben Ergebnis kommt man durch die folgende Überlegung, welche die Frage beantwortet, ob man nicht durch Auflegen eines Gewichtstückes auf die zurückgehende Taste beliebig viel von der aufgewandten Energie zurückgewinnen kann. Wir betrachten das System, welches aus der Taste und der gesamten mit ihr in Wechselwirkung stehenden Umgebung gebildet wird, in dem Zeitraum zwischen dem Augenblick, in dem der Schreiber die gedrückte Taste losläßt, und einem Zeitpunkt kurz vor Beginn des nächsten Tastendrucks. Das Geschehen an der Taste ändert sich nicht, wenn wir uns dieses System als von der übrigen Welt abgeschlossen denken; denn alle Faktoren, die das Geschehen an der Taste bestimmen, sind ja in das System eingeschlossen. Das System befinde sich anfänglich im Zu-

stand I, in dem die Taste noch in Kontaktstellung steht (während der Schreiber seine Hand schon zurückgezogen hat). Es wird verlangt, daß das System ohne äußere Einwirkung in den Zustand II übergehen soll, in welchem die Taste in der Ruhestellung steht, und in diesem Zustand verbleibe, und zwar soll die Wahrscheinlichkeit für den Übergang in den Zustand II gegeben sein durch  $(1-w)$ , die Wahrscheinlichkeit für das Verbleiben im Zustand I bzw. für die Rückkehr aus dem Zustand II in den Zustand I durch  $w$ ,<sup>15</sup> wobei gilt:  $w \ll 1/m$ . Ist  $S_I$  die thermodynamische Entropie des Zustands I,  $S_{II}$  die des Zustands II, so gilt folglich:  $(S_{II}-S_I) = k \cdot \ln(1-w) - k \cdot \ln(w) \approx k \cdot \ln(1/w) > k \cdot \ln(m)$ . Dies ist die Mindestzunahme der thermodynamischen Entropie beim einmaligen Tastendruck, und  $E = T \cdot k \cdot \ln(1/w)$  ist der Mindestbetrag an aufgewandter Energie, der nicht zurückgewonnen werden kann. Für  $r$  getastete Buchstaben folgt dann wieder  $dS > dS'$ .

Die gleichen Beziehungen wie beim Schreiben gelten beim *Lesen*. Als einfachstes Beispiel einer „Schrift“ betrachten wir eine rechteckige Glastafel von  $m$  Millimeter Breite und  $r$  Millimeter Länge. Die Tafel sei in Quadrate von je 1 Millimeter Seitenlänge eingeteilt; wir können sie also auffassen als zusammengesetzt aus  $r$  „Querstreifen“, welche aus je  $m$  Quadraten bestehen. Auf dieser Tafel wird geschrieben, indem in jedem Querstreifen ein Quadrat mit einer Farbe bedeckt wird, welche das Licht sehr gut reflektiert. Da innerhalb eines Querstreifens  $m$  verschiedene Quadrate zur Auswahl stehen, kann man auf diese Weise  $m$  verschiedene Arten von „Zeichen“ schreiben. Die ganze Platte stellt dann eine Aufeinanderfolge von  $r$  Zeichen dar.

Um diese „Schrift“ zu lesen, werden von einem Lichtstrahl nacheinander die einzelnen Querstreifen und innerhalb der Querstreifen die einzelnen Quadrate abgetastet. Durch ein durchsichtiges Quadrat geht der Lichtstrahl unverändert hindurch, und seine Energie kann als Strahlungsenergie weiterverwendet werden. Von einem mit reflektierender Farbe bedeckten Quadrat wird der Lichtstrahl in das Auge des Beobachters reflektiert und dort von der Netzhaut absorbiert, wobei eine Lichtempfindung ausgelöst wird. Es muß wieder so sein, daß für die Auslösung einer Lichtempfindung eine bestimmte Mindestenergie erforderlich ist, weil sonst schon durch thermische Energieschwankungen Lichtempfindungen ausgelöst würden. Kehrt die Netzhaut in den Ruhezustand ohne Lichtempfindung zurück, so wird die absorbierte Strahlungsenergie letzten Endes in Wärmeenergie verwandelt. Alle weiteren Überlegungen verlaufen wie oben beim Schreiben.

<sup>15</sup> Es wird angenommen, daß das System nur die beiden genannten Zustände annehmen kann.