

DIE BEDEUTUNG DES 2. HAUPTSATZES DER THERMODYNAMIK FÜR DAS MENSCHLICHE LEBEN

Die Begriffswelt der Thermodynamik hat sich im Laufe ihrer Wissenschaftsgeschichte erweitert, präzisiert und vertieft. Eine Reihe berühmter Wissenschaftler, wie *J.R. Mayer*, *Joule*, *Helmholtz*, *Clausius*, *Boltzmann*, *Ostwald* und in jüngerer Zeit *Einstein*, *Heisenberg* und *Prigogine* — um nur einige zu nennen —, schuf diese Begriffswelt und stellte auch Überlegungen an, inwieweit Erkenntnisse dieses Wissenschaftszweiges Erklärungsmodelle für andere Wissenschaftsgebiete liefern bis hin zu Fragen der Entstehung von Leben. Der Autor verfolgt in einem kurzen geschichtlichen Abriss der Thermodynamik speziell die Erkenntnisse, die Verknüpfungen zu anderen Wissensgebieten erlauben. Er interpretiert Aussagen der Thermodynamik, die als Erklärungs- und Deutungsmodell für das Verständnis evolutionärer Lebensprozesse hilfreich sein können.

K. Knizia, Dortmund*)

Die Entwicklung der Thermodynamik im vorigen Jahrhundert hat nicht nur das Verständnis naturwissenschaftlicher und technischer Vorgänge vertieft, sondern auch der Philosophie neue Impulse gegeben. So hat sie uns zugleich gelehrt, daß alle biologischen Vorgänge auch auf Energieumsetzungen gründen und daß man mit ihr bis in die Nähe des Verständnisses für die Entstehung des Lebens gelangen kann. Da aber auch das Leben stützende Organisationsformen braucht, wie die Symbiose alles Lebenden, das Gruppenverhalten vieler Arten oder die Staatenbildung bei Tieren und Menschen bis hin zur Ausprägung von Rechtsordnungen, Wirtschaftssystemen und philosophischen Denkgebäuden, die zumindest in Analogie zu den in der Thermodynamik geltenden Gesetzmäßigkeiten ablaufen, vertieft die Thermodynamik auch hier unsere Erkenntnis. Ein Blick in die Entwicklungsgeschichte der Thermodynamik hilft, das Thema zu erläutern.

Entwicklungsgeschichtlicher Abriss der Thermodynamik

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts sprach *Julius Robert Mayer* als erster den Satz von der Erhaltung der Energie aus. Dies war fast zeitgleich mit einer Reihe anderer Forscher geschehen und in der Tradition einer seit dem Altertum bestehenden Beschäftigung mit Überlegungen zur Erhaltung der Kraft. *Mayer* war Arzt und Philosoph.

Die Erkenntnis des Energieerhaltungssatzes, des **ersten** Hauptsatzes der Thermodynamik, war ihm bei Untersuchungen über den Sauerstoffverbrauch beim Menschen während einer Ostindienreise im Jahr 1840 gekommen. 1842 veröffentlichte er seine Erkenntnis der Äquivalenz von Wärme und Arbeit in *Wöhlers* und *Liebigs* „Annalen der Chemie und Pharmazie“, und 1845 setzte er sich in seiner Schrift „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel“ mit dem Energieerhaltungssatz vollständig auseinander. Er sagt dort: „Es gibt in Wahrheit nur eine einzige Kraft. Im ewigen Wechsel kreist dieselbe in der toten wie in der lebenden Natur; dort und hier kein Vorgang ohne Formänderung der Kraft.“ Der Begriff Kraft wurde damals auch im Sinn von Energie

gebraucht. *Mayer* hatte um die Priorität seiner Entdeckung zu kämpfen. Insbesondere *Joule* und *Helmholtz* waren zeitgleich mit ihm oder doch nur wenig später zu gleichen Überlegungen gekommen. *Helmholtz* kam wie *Mayer* von der Medizin. Er formulierte 1847 in der der Berliner Physikalischen Gesellschaft vortragenen Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft“ seinerseits das Energieprinzip.

„Was Kraft, was Wärme ist, brauchen wir nicht zu wissen, aber das müssen wir wissen, wie man die Kraft oder Arbeit nach unveränderlichen Einheiten zählt, und daß und welche Größenbeziehung zwischen dem Meterkilogramm und der Wärmeeinheit stattfindet. Dieses Wissen ist es, welches die Grundlage einer neuen Wissenschaft bildet und welches eine Neugestaltung der Naturwissenschaften hervorruft“, hat *Mayer* einmal festgestellt. Und tatsächlich schien in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts der erste Hauptsatz der Thermodynamik der Höhepunkt und die Krönung der Physik zu sein, woraus sich die Heftigkeit des Prioritätsstreites erklärt. Noch im Jahr 1874 riet der Münchner Physiker *Jolly* dem jungen *Max Planck* von einem Physikstudium ab, da die Physik nach der Entdeckung des Energieerhaltungssatzes bald ihre endgültige stabile Form angenommen haben werde.

Man konnte damals nicht ahnen, daß die bereits wenige Jahre nach *Mayers* Entdeckung durch *Rudolf Clausius* ausgesprochene endgültige Fassung des **zweiten** Hauptsatzes der Thermodynamik unser Naturverständnis noch tiefgreifender erweitern und völlig neue Wege eröffnen sollte.

Rudolf Clausius beschäftigte sich bereits 1850 in einer Abhandlung „Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre ableiten lassen“ mit den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik. Er fand, daß sich Widersprüche zu Carnots Theorie aufklären lassen, wenn Wärme nicht als Stoff, sondern als die Bewegung der kleinsten Teile der Materie verstanden wird. Wenn dieses richtig ist, so schloß er, dann muß sich auf die Wärme auch der allgemeine Satz der Mechanik anwenden lassen, daß eine vorhandene Bewegung sich in Arbeit umsetzen kann,

*) Der Autor ist Vorsitzender des Vorstandes der Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund. Der Aufsatz basiert auf einem Vortrag (Plenarvortrag), der anlässlich der VDI-GET-Jahrestagung am 25./26. Februar 1986 in Darmstadt gehalten wurde.

und zwar so, daß der Verlust an lebendiger Kraft, also kinetischer Energie, der geleisteten Arbeit proportional ist. Er schreibt an anderer Stelle: „Bei näherer Betrachtung findet man aber, daß nicht das eigentliche Grundprinzip von *Carnot*, sondern nur der Zusatz, daß keine Wärme verloren gehe, der neuen Betrachtungsweise entgegensteht.“ 1854 beschrieb er in einer Abhandlung „Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie“ den Satz von der Äquivalenz der Verwandlungen:

„In allen Fällen, wo eine Wärmemenge in Arbeit verwandelt wird und der diese Verwandlung vermittelnde Körper sich schließlich wieder in seinem Anfangszustand befindet, muß zugleich eine andere Wärmemenge aus einem wärmeren in einen kälteren Körper übergehen, und die Größe der letzteren Wärmemenge im Verhältnis zur ersteren ist nur von den Temperaturen der beiden Körper, zwischen welchen sie übergeht, und nicht von der Art des vermittelnden Körpers abhängig.“

Wir nennen heute den Teil einer Wärmemenge, der in Arbeit umgewandelt werden kann, Exergie, den nicht umwandelbaren Teil Anergie. Wir können Exergie auch als gerichtete Energie im Gegensatz zu der regellosen, kinetischen Energie der kleinsten Teile bezeichnen, die wir als Wärme empfinden. In der Natur befinden sich Atome, Moleküle, Elektronen oder Ionen, die Arbeit verrichten können je nach Aggregatzustand in ungeordneter Bewegung. Die Brownsche Bewegung verdeutlicht das. Erst wenn wir ihnen eine gemeinsame Richtung zu geben vermögen, wenn ein Gefälle entsteht, können wir ihnen auch eine gemeinsame Aufgabe übertragen.

Beim Menschen nennen wir die freiwillige Ausrichtung ihres Willens auf bestimmte Ziele Motivation.

Clausius gibt drei Formulierungen des zweiten Hauptsatzes an:

– Es kann nie Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen, wenn nicht gleichzeitig eine andere damit zusammenhängende Änderung eintritt

oder

– die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen

und schließlich nach einer Erläuterung des „von selbst“

– ein Wärmeübergang aus einem kälteren in einen wärmeren Körper kann nie ohne Kompensation stattfinden.

Einige Seiten weiter formuliert er den Satz von der Äquivalenz der Verwandlungen als das Integral über dQ/T und folgert, daß die Verwandlungen sich bei umkehrbaren Prozessen aufheben müs-

sen, während die Summe der Verwandlungen bei nicht umkehrbaren, bei irreversiblen Prozessen nur positiv sein kann. Alle wirklichen Prozesse sind irreversibel. Bei ihnen nimmt also die Entropie zu.

1865 benennt *Clausius* in der Arbeit „Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie“ den Äquivalenzwert der Verwandlung mit dem aus dem Griechischen entlehnten Begriff Entropie – die Verwandlung. Hätte er sich auf das Lateinische bezogen, hätte er den Begriff Evolution wählen müssen.

Clausius benannte den Mayerschen Satz von der

– Äquivalenz der Wärme und Arbeit als den ersten und den von ihm modifizierten Carnotschen Satz, der durch Übergang von der begrifflichen Vorstellung von der Wärme als Stoff zur Wärme als Bewegung entstand, zum Satz von der

– Äquivalenz der Verwandlungen als zweiten Hauptsatz der Wärmelehre.

Er formulierte sie kurz so:

Erster Hauptsatz:

● In einem abgeschlossenen System bleibt die Energie konstant.

Zweiter Hauptsatz:

● In einem abgeschlossenen System strebt die Entropie einem Maximum zu.

Analogien zwischen Thermodynamik und organischem Leben

Nun sind wirklich auftretende Systeme nicht abgeschlossen. Sie stehen im Energie- und meistens auch im Materieaustausch mit der Umgebung; und dennoch haben die beiden Hauptsätze für die Organisation anorganischer Materie wie für das Leben und auch für das menschliche Handeln außerordentliche Bedeutung.

Mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik tritt also der Begriff der Irreversibilität in die Physik ein, jener Vorgänge also, die von selbst nur in einer Richtung verlaufen und die sich auf keine Art und Weise rückgängig machen lassen, ohne daß eine Veränderung in der Natur zurückbleibt. Irreversibilität ist die Ursache dafür, daß der exergetische Wirkungsgrad einer Energieumwandlung nicht zu 1 werden kann; sie ist aber zugleich auch der Antrieb dafür, daß diese Umwandlung in begrenzter Zeit und mit begrenztem Aufwand für die materielle Umgebung, die die Umwandlung erst ermöglicht, geschehen kann.

Arnold Sommerfeld zitiert in „Vorlesungen über theoretische Physik“ (Bd. IV, 1952) einen Satz von *R. Emden*,

der die Bedeutung der Energie und der Entropie anschaulich erläutert:

„Als Student las ich mit Vorteil ein kleines Buch von *F. Wald* „Die Herrin der Welt und ihr Schatten“. Damit waren Energie und Entropie gemeint. Mit zunehmender Einsicht scheinen nur die beiden ihre Plätze gewechselt zu haben. In der riesigen Fabrik der Naturprozesse nimmt das Entropieprinzip die Stelle des Direktors ein, denn es schreibt die Art und den Ablauf des ganzen Geschäftsgangs vor. Das Energieprinzip spielt nur die Rolle des Buchhalters, indem es Soll und Haben ins Gleichgewicht bringt“.

Clausius baute fast gleichzeitig mit *Krönig* die von *Daniel Bernoulli* begründete kinetische Gastheorie aus und berechnete die mittlere freie Weglänge von Atomen und Molekülen in Gasen. Er schaffte auch das Verständnis für Reibung und Wärmeleitung und die Diffusion von Gasen.

Auf den Arbeiten zur kinetischen Gastheorie konnte dann *Ludwig Boltzmann* aufbauen; nicht nur auf denen von *Clausius* und *Krönig*, sondern auch auf denen des Begründers der statistischen Mechanik, des Amerikaners *Gibbs*.

Ludwig Boltzmann wies als erster darauf hin, daß die Entropie ein Maß für molekulare Unordnung ist. Nach ihr entspricht die Zunahme der Entropie der Zunahme der Desorganisation. Desorganisation bedeutet Entwertung; und deswegen spricht *Kelvin* den zweiten Hauptsatz, nach dem in abgeschlossenen Systemen die Entropie einem Maximum zustrebt, auch so aus:

„Die in einem isolierten System vorhandene Energie strebt einer Dissipativ oder Entwertung, dem Übergang gleichmäßig verteilte Wärmeenergie zu

Da die Richtung der Entropiezunahme auf den Abbau von Gefällen, auf den Ausgleich nämlich, ausgerichtet ist, sind in einem abgeschlossenen System mit noch nicht maximaler Entropie die Ausgleichsvorgänge eben noch nicht abgeschlossen; es bestehen Unterschiede die einander „zugeordnet“ werden, (somit Ordnungszustände darstellen können. Diese Ordnungszustände sind im Wirkungszusammenhang des natürlichen Geschehens durch Naturgesetze miteinander verknüpft. Die Naturwissenschaft fühlte sich über Jahrzehnte hinweg sicher dort, wo es ihr lang, Abläufe in einen kausalen Zusammenhang zu bringen.

Jedes abgeschlossene System kann solche Ordnungszustände „von selbst“ verlieren, aber nicht „von selbst“ gewinnen; es kann sie nicht einmal „von selbst“ halten. Um Ordnungszustände aufzubauen oder zu erhalten, muß in der Umgebung des betrachteten Systems eine Veränderung zurückbleiben. Ordnungszustände aufzubauen oder zu erha-

heißt in dem betrachteten System, die Entropie zu vermindern oder ihr Anwachsen aufzuhalten. Das kann aber wegen der insgesamt geltenden Asymmetrie, die der zweite Hauptsatz ausspricht, immer nur auf Kosten einer Entropieerhöhung in einem anderen System geschehen.

Ein System maximaler Entropie hat keine Arbeitsfähigkeit, keine Exergie mehr. Führen wir ihm Arbeitsfähigkeit zu, so lassen sich wieder Unterscheidungsmöglichkeiten, Gefälle oder, wie *Wilhelm Ostwald* umfassender feststellte, Intensitätsunterschiede aufbauen; es kann in den Zustand geringerer Entropie zurückgeführt werden; es kann einen Zustand höherer Unterscheidbarkeit erhalten.

Dazu gehört aber die physikalisch richtige Form der Arbeitsfähigkeit, und sie muß in für den Zweck geeigneter Art und Weise eingesetzt sein. Somit kommt zu der Arbeitsfähigkeit noch die **Information**.

Information kann bei Vorgängen in der Natur das Einwirken eines Naturgesetzes sein; sie kann in der Biologie die Erbinformation oder im Fall des Menschen Kreativität sein. Exergie und Information zusammen bilden, so sagen wir heute, Negentropie. Besser wäre, dafür den auch vorgeschlagenen Ausdruck Ektropie zu wählen. Information ist hierbei anders als im landläufigen Sinn zu verstehen; sie ist zu verstehen aus der strikten Übersetzung des Wortes Information = Gestaltung oder in Analogie zu Arbeit und Arbeitsfähigkeit auch als Gestaltungsfähigkeit. Negentropie oder Ektropie ließen sich dann als Gestaltungsenergie oder als Schöpfungsenergie übersetzen.

Für uns gewinnen Ordnungszustände ihren Sinn erst dadurch, daß sie einem Zweck in einem System folgen, welcher der Entropiezunahme in abgegrenzten, für uns wichtigen Systemen entgegen gesetzt ist und der das Leben erst ermöglicht. Wählen wir ein Beispiel: Ein Haufen von Steinen kann durch Zufuhr von Negentropie, also von Arbeitsfähigkeit und Information, verwendet werden, um Häuser oder eine Straße zu bauen. Die Straße kann Städte verbinden oder einfach nur zum Badestrand führen. Häuser können einfach nur vor Wind und Wetter schützen; sie können aber auch Schulen oder Krankenhäuser oder gar eine Kathedrale sein. Nur Steine nach einem Muster aufzurichten schafft noch keinen, gegenüber der vorherigen zufälligen Verteilung der Steine, bevorzugten Ordnungszustand zum Nutzen für den Menschen oder das Leben, sondern würde zu einer nutzlosen Zerstreuung der eingesetzten Arbeitsfähigkeit führen, so als wäre Energie auf ihrem Weg zur völligen Dissipation nicht

über den Umweg der Gewinnung von Arbeitsfähigkeit gezwungen worden.

Aber auch im Falle der für uns sinnvollen Einrichtung von Straßen oder Häusern ist die eingesetzte Arbeitsfähigkeit über Reibungswärme zum Schluß bis auf Wärmeenergie auf dem Niveau der Umgebungstemperatur dissipiert. Wir sehen also, daß die Sinnggebung in Richtung auf Begünstigung des Lebens in seiner Vielfalt ausgerichtet sein muß, ohne sie ist eine zufällig von größerer Gleichförmigkeit abweichende Verteilung für uns eben sinnlos. Was Begünstigung des Lebens ist, wird jedoch schwer zu definieren sein bei dem Wettbewerb der Individuen einer Art untereinander und bei dem Bestreben der einzelnen Arten, einen möglichst die eigene Art fördernden Lebensraum zu erhalten. Begünstigung des Lebens kann nach unserem heutigen Verständnis eigentlich nur die langfristige Erhaltung der Lebensfähigkeit für die Vielzahl der Arten und die Verminderung von Leiden bedeuten.

Exergie ist gerichtete Energie; sie kann durch Information erfolgreich werden, um Ordnungen zu ermöglichen. Die Natur ist dem Menschen bei der Schaffung von Ordnungszuständen weit voraus; sie hat Ordnungszustände von höchster Komplexität geschaffen, die wir das Leben nennen; sie hat den Menschen geschaffen.

Wir nutzen Wärme, um ihr Arbeitsfähigkeit zu entziehen und aus ihr und angewandter Information Negentropie zu gewinnen.

Wärme kann nun aber nicht in Arbeit umgewandelt werden ohne Einsatz von Information und Materie, ohne eine geeignete Umgebung also.

Die Beschaffung und Anwendung von Information und Materie erfordert aber auch wieder Arbeit, vorgetane Arbeit. Also: Wärme kann nicht in Arbeit umgewandelt werden ohne den vorhergehenden Aufwand von Arbeit.

Das Mißverhältnis von vorher aufzubringender Arbeit zu gewinnbarer Arbeit ist es, das die meisten Vorschläge für die alternative Gewinnung von Arbeitsfähigkeit unbrauchbar macht. Vorgetane Arbeit bezeichnen wir als Kapital.

Wenn wir den in der klassischen Volkswirtschaftslehre mit Boden bezeichneten Produktionsfaktor umfassender mit Materie gleichsetzen oder auch als Natur, die die materiellen Lebensmöglichkeiten darbietet, dann ergibt sich die Verbindung zwischen den Produktionsfaktoren

Energie – Materie – Information

und den klassischen Produktionsfaktoren

Arbeit – Kapital – Boden.

Doch kehren wir zu *Boltzmann* zurück.

Er führte die Wahrscheinlichkeitsrechnung in die Physik ein, weil er durch die grundsätzliche Frage, „Wie ist die Irreversibilität der thermischen Vorgänge zu verstehen, wenn man sie auf die ihrem Wesen nach reversible Mechanik zurückführen kann?“ auf die statistischen Vorgänge gestoßen war. Über das Boltzmannsche H-Theorem wurde das Verhalten der thermodynamisch definierten Entropie durch mechanische Vorgänge erklärt, nämlich durch die Geschwindigkeitsverteilung und -veränderung infolge von Zusammenstößen der Gasmoleküle. Es enthält die Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, aber nicht aus der Erfahrung, sondern aus den Gesetzen der statistischen Mechanik abgeleitet, und bildet den Ausgangspunkt für die Aufdeckung des Zusammenhangs zwischen der Entropie und der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit. Die Entropie ist danach gleich dem Produkt aus der Boltzmannkonstanten und dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit, wobei der Logarithmus darauf hinweist, daß die Entropie eine additive, während die Wahrscheinlichkeit eine multiplikative Größe ist. *Prigogine* bemerkte in seinem Buch „Dialog mit der Natur“ (1980), daß die wesentliche Neuerung darin bestand, die Wahrscheinlichkeit nicht als Mittel der Näherung, sondern als Erklärungsprinzip in die Physik einzuführen, mit dessen Hilfe gezeigt werden sollte, daß ein System, das aus einer großen Population besteht, auf die die Wahrscheinlichkeitsgesetze Anwendung findet, allein aufgrund dieser Tatsache ein neuartiges Verhalten annehmen kann.

Die Thermodynamik und die kinetische Gastheorie sollten das Tor in die heutige Physik aufstoßen und die moderne Atomphysik begründen; der Wirkungszusammenhang des natürlichen Geschehens wurde durch akausale – nicht deterministische – Naturgesetze ergänzt. Die Außergewöhnlichkeit des neuen Denkens bewegt die Physik auch heute noch, ein neuer Abschnitt begann.

Zunächst einmal hatten die Atomisten jedoch noch einen Strauß mit den Positivisten auszufechten, die unter der Führung von *Ernst Mach* und *Wilhelm Ostwald* standen und die besonders mit *Ostwald* eine philosophische Denkrichtung, die Energetik, ausformten. Für die Positivisten waren die Atome nur Gedankenfiguren, denen keine reale Bedeutung zukomme. *Ostwald* wollte im Gegensatz zu *Boltzmann* die Mechanik auf die Energetik gründen.

1905 sollte dann *Albert Einstein* in seinen „Untersuchungen über die Theorie der Brownschen Bewegung“ auf rein klassischer Grundlage einen direkten und abschließenden Beweis für die atomistische Struktur der Materie liefern.

Heisenberg ging später von dem positivistischen Prinzip aus, daß zur Beschreibung physikalischer Sachverhalte nur „prinzipiell beobachtbare Größen“ herangezogen werden dürfen. Seit Heisenberg muß von der Grundüberzeugung der klassischen Physik abgegangen werden, daß die vorhandenen Eigenschaften unabhängig von der Beobachtungsmethode da seien. *Ilya Prigogine* erklärt diese nicht in einem Modell zu beschreibende Komplementarität sehr schön in seinem Buch „Vom Sein zum Werden“ (1979): „Die Welt ist reicher, als es sich in einer einzigen Sprache ausdrücken läßt. Die Musik erschöpft sich nicht in ihren aufeinanderfolgenden Stilen von *Bach* bis *Schönberg*. Genausowenig können wir die vielfältigen Aspekte unserer Erfahrung zu einer einzigen Beschreibung kondensieren.“

Die Doppelnatur von Teilchen und Welle gestattet es, immer nur eine Seite seiner Existenz zu beobachten, während die komplementäre Seite gleichzeitig zu bestehen aufhört. Die unterschiedlichen Auffassungen der Atomisten und der Energetiker lassen sich so zwar nicht austräumen, aber in dem Maß, in dem sich dieser Dualismus unserer Vorstellungsfähigkeit entzieht, wird das Teilchen nun auch wieder zu einem Gedankending. Physik und Metaphysik berühren sich. *Hermann Weyl* kommt in seinem berühmten Werk „Raum-Zeit-Materie“ (1918) zu der auch in diesem Zusammenhang zutreffenden Überzeugung, daß die Physik gar nicht vom Materiellen, Inhaltlichen der Wirklichkeit handelt, sondern nur von deren formaler Verfassung. Sie habe damit für die Wirklichkeit die gleiche Bedeutung wie die formale Logik für die Wahrheit. Zwar würden die Gesetze der Physik in der Wirklichkeit niemals verletzt, genauso wenig wie es Wahrheiten gebe, die mit der Logik nicht übereinstimmen. Ob eine konkrete Behauptung wahr sei, darüber sage sie allerdings nichts, wie auch der Grund der Wahrheit eines Urteils in der beurteilten Sache und nicht in der Logik liege. *Peacocke* macht in seinem Buch „An introduction to the physical chemistry of biological Organisation“ (1983) die Feststellung, daß die Thermodynamik für die physikalische Chemie das bedeute, was Logik für die Philosophie sei; und er stellt fest, daß die Politik die Kunst des Möglichen genannt werde, die Thermodynamik dagegen sei die Wissenschaft des Möglichen.

1886 sagte *Boltzmann* in einem Vortrag mit dem Thema „Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie“ anlässlich einer feierlichen Sitzung der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien: „Der allgemeine Daseinskampf der Lebewesen ist nicht ein Kampf um die Grundstoffe — die

Grundstoffe aller Organismen sind in Luft, Wasser und Erdboden im Überfluß vorhanden —, auch nicht um Energie, welche in Form von Wärme leider unverwandelbar in jedem Körper reichlich vorhanden ist, sondern ein Kampf um die Entropie, welche durch den Übergang von der heißen Sonne zur kalten Erde disponibel wird.“ Erinnern wir uns an das Wort vom Entropieprinzip, das der Direktor in der riesigen Fabrik der Naturvorgänge sei. Dieser Direktor weiß, wie die Ausrüstung seiner Fabrik beschaffen sein muß, damit er aus dem ihm verfügbaren Energiestrom die jeweils geforderte Negentropie gewinnen kann.

Im übrigen war *Boltzmann* ein glühender Anhänger *Darwins*. „Wenn sie nach meiner innersten Überzeugung fragen“, sagte er in dem gleichen Vortrag, den ich eben zitiert habe, „ob man es einmal (das 19. Jahrhundert) das eiserne Jahrhundert oder das Jahrhundert des Dampfes oder der Elektrizität nennen wird, so antworte ich ohne Bedenken, das Jahrhundert der mechanischen Naturauffassung, das Jahrhundert *Darwins* wird es heißen.“

Also das Jahrhundert der mechanischen Naturauffassung — so wichtig war ihm die Rückführung der Thermodynamik auf die Mechanik und *Darwins* Prinzip, wohl ahnend, daß es ein aus der Thermodynamik ableitbares Prinzip ist.

François Jacob schrieb in seinem Buch „Die Logik des Lebenden“ (1972): „Für *Darwin* wie für *Boltzmann* und *Gibbs* wirken sich die Naturgesetze nicht auf Einzelwesen aus, sondern auf große Populationen. Unabhängig von den jeweiligen Unregelmäßigkeiten im Verhalten jeder einzelnen Einheit wird die Größe der ins Spiel kommenden Anzahl letztlich der Gesamtheit eine Regelmäßigkeit aufzwingen. Die Analogie zwischen den beiden Denkweisen geht jedoch noch weiter; in erster Linie deshalb, weil bei der statistischen Mechanik wie bei der Evolutionstheorie die Vorstellung der Zufälligkeit ins Zentrum des Naturgeschehens gestellt wird.“

Wilhelm Ostwald war im übrigen, trotz der sachlich nicht haltbaren Auffassung der Energetiker, in seiner philosophischen Auffassung über die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes gleicher Ansicht wie *Boltzmann*, wenn er sagte: „Alles Leben erweist sich als ein Wettbewerb um die freie Energie, deren zugängliche Menge beschränkt ist.“ Er leitete daraus seinen energetischen Imperativ ab:

„Vergeude keine Energie, verwerte sie!“

Aber auch die Zeitrichtung, die der zweite Hauptsatz festlegt, sprach *Ostwald* an. Diese Nichtumkehrbarkeit des Zeitablaufs führte ihn auf den Wertbegriff und damit zu ethischen Kategorien.

Ostwald nannte den zweiten Hauptsatz wohl auch deshalb das Gesetz des Geschehens. Das Auftreten der Irreversibilität, der Nichtumkehrbarkeit, sei es, das den Zeitablauf anzeige. Der Zustand mit höherer Entropie sei der spätere, gibt *Eddington* an, und er sei außer der Expansion des Weltalls die objektive Möglichkeit, den Verlauf der Zeit zu bestimmen; subjektiv komme der Erfahrungszugewinn des einzelnen hinzu. Doch da wird es schwierig. *Ilya Prigogine* bezieht sich in seinem Buch „Vom Sein zum Werden“ auf die Schwierigkeit, die Irreversibilität in der Physik zu begründen, wenn er jeweils die aktive Rolle des Beobachters bei einer derartigen Feststellung einbeziehen will und feststellt, daß die Irreversibilität nicht in der Natur, sondern in uns begründet sei; schon *Einstein* habe immer wieder geantwortet, daß Irreversibilität eine Illusion sei, ein subjektiver Eindruck, der von ungewöhnlichen Anfangsbedingungen herühre. Das führt uns wieder auf die Sinnfrage bei Aufbau und Erhalt von Ordnung und Ordnungssystemen zurück.

Wenn der zweite Hauptsatz eine evidente, nicht umkehrbare Abfolge aller Handlungen festlegt, dann sind auch menschliche Handlungen nicht rückgängig zu machen, denn sonst wäre jeder Fehler, jede bereuenswürdige Tat, durch Umkehrung zu korrigieren. Aber es kommt nicht nur auf die Tat an, auch ein unbedachtes Wort kann nicht zurückgenommen werden.

In neuerer Zeit wird die Informationstheorie auf den Entropiebegriff aufgebaut. 1949 erschien das grundlegende Werk von *Weaver* und *Shannon* „The Mathematical Theory of Information“. *Weaver* sagte da: „In der Physik ist die Entropie einer Situation ein Maß für die Zufälligkeit oder die „Vermischtheit“ und die Neigung physikalischer Systeme, sich mehr und mehr zu desorganisieren oder mehr und mehr zu vermischen. Dies ist so grundlegend, daß *Eddington* feststellte, gerade diese Tendenz gäbe der Zeit ihren Richtungspfeil“. Er machte weiter auf die Ähnlichkeit von Entropie und Information aufmerksam, die auch für die Information einen ähnlichen Ausdruck ergibt wie für die Boltzmannsche Gleichung und damit auch in ihrer statistischen Natur charakterisiert wird. Dabei geht es darum, eine Nachricht reproduzierbar zu machen, ohne Frage nach ihrem sinnvollen oder unsinnigen Inhalt. Auch eine von der Nachrichtenquelle produzierte „sinnlose“ Nachricht gehört in diese Theorie. Beispiele dafür erleben wir alle in unserem täglichen Umgang mit den Medien. Ordnung ist in diesem ersten Sinn zunächst einmal Unterscheidbarkeit gegenüber nicht mehr unterscheidbarer Vermischtheit. Für den Sinn in dieser Ordnung ist der Nachrich-

tenproduzent verantwortlich. Hier spannt sich mit dem Begriff Information ein weiter Bogen zwischen den beiden hier mit diesem Wort gemeinten Begriffen, nämlich ihrem Beitrag zur Gestaltungsfähigkeit, die mit der Sinnfrage verbunden ist, und dem reinen unverfälschten Transport von Impulsen und ihrer sicheren Übersetzung in Begriffe.

Die gedankliche Verbindung von Entropie und Information im Sinne der Informationstheorie führt auf den Begriff der strukturellen Entropie. Die uns umgebende Materie läßt sich zu beliebigen Mikrozuständen zusammensetzen. Soll ein bestimmter Zustand in der Natur ohne unser Zutun oder aber auch von Menschen hergestellt werden, so kann die so angestrebte Verminderung der strukturellen Entropie nur durch eine Vermehrung der thermodynamischen Entropie erreicht werden oder – mit Ostwald – nur durch Vernutzung freier Energie.

In der Informationstheorie wurde der Begriff Negentropie für die Verminderung der Entropie zu einem höher organisierten Informationszustand geprägt. In der Physik findet sich der Begriff Ektropie. Ich habe früher erläutert, daß der Begriff der Information in einem anderen als gemeinhin von der Informationstheorie benutzten Sinn, nämlich zusammen mit physikalischer Arbeitsfähigkeit als Gestaltungsenergie, d.h. als sinnvolle Anwendung von naturgesetzlichen Zusammenhängen zur Gewinnung von Ektropie oder Negentropie, zu verstehen ist.

Im Sinne des früher gebrauchten Boltzmann-Zitates muß also bei allen natürlichen oder menschlichen Vorgängen, die als ektropisch zu bezeichnen sind, der Entropiestrom, der beim Ausgleich des unwahrscheinlichen Zustands unseres Sonnensystems fließt, dazu benutzt werden, unwahrscheinliche Zustände herzustellen, die wir unter gewissen Umständen als Ordnungen bezeichnen. Es ist das Temperaturgefälle zwischen der Sonne und der Erde, das den Entzug von Arbeitsfähigkeit zum Aufbau geordneter Strukturen ermöglicht.

In der Natur begegnen wir häufig nach dem zweiten Hauptsatz unwahrscheinlichen Zuständen, wie Temperatur- oder Druckdifferenzen und Gefällen; und erst recht das Leben in seinen vielfältigsten Formen ist nach statistischen Betrachtungen völlig unwahrscheinlich.

Naturgesetze geben die Regeln an, nach denen die Energie auf ihrem Weg zur Dissipation sich Bahnen sucht. Daß bei diesem allgemeinen Abbau von Ordnungen bis zur völligen Vermischtheit dennoch in abgeschlossenen Systemen Ordnungen entstehen können, ist nur scheinbar ein Widerspruch. Naturgesetze, so haben wir in der Entwicklung

der Thermodynamik gesehen, sind nunmehr nicht nur die kausalen Beziehungen, mit denen sich die Naturwissenschaften bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts abgegeben haben und die jeweils bezogen auf die Betrachtung gewissermaßen einen Schnitt durch den gesamten Wirkungszusammenhang legten, etwa wie Kegelschnitte je nachdem zu Kreis, Ellipse, Parabel oder Hyperbel führen. Naturgesetze folgen da, wo es sich um sehr große Zahlen von Individuen handelt, wie etwa in der kinetischen Gastheorie, statistischen Gesetzen; sie können, so lehrt die jüngste Entwicklung in der Thermodynamik, im Einklang mit dem durch den zweiten Hauptsatz eingeführten Prinzip der Energiedissipation, des Entropieprinzips, auch rein stochastisch ablaufen. Das, was wir unter Zufall verstehen, ist eben für die Entstehung von Ordnungen bis hin zur komplexen Lebensformen auch eine Notwendigkeit. Information als Gestaltungsfähigkeit im Sinne des Zusammenwirkens mit der Exergie, im Sinne von Negentropie, gewinnt so einen weiteren Rahmen. Ist die Anwendung menschlicher Kreativität zur Schaffung von Negentropie nicht auch von stochastischen Vorgängen beeinflusst? Vernunft und Gefühl bestimmen schließlich mit unterschiedlichem Gewicht menschliche Handlungen. Die Ethik rät uns, was zu tun ist, die Ordnungszustände, die wir Schöpfung nennen, zu erhalten; die Ästhetik vermittelt uns das Gefühl der Erhabenheit, Ordnungen dargestellt zu finden und erkannt zu haben.

Glandsdorff und *Prigogine* haben Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre eine generalisierte Thermodynamik entwickelt, die die makroskopische Theorie der Fluktuationen, der Schwankungen also, darstellt, die stochastisch bei physikalischen Vorgängen auftreten können. *Prigogine* spricht von der Ordnung durch Schwankungen, und er sucht zu ergründen, wie durch den Fluß von Energie und Materie das, was vorher Schwankung war, nun zu einer stabilen Struktur wird. Während *Boltzmann* sich fragte, wie diese Irreversibilität der Thermodynamik auf die reversible Mechanik zurückzuführen ist, lautet *Prigogines* Frage: „Wie kann jeder einzelne Schritt eines evolutionären Prozesses, in dem jede Stufe zu geordneteren oder zumindest komplexeren Konfigurationen führt, in sich die Fähigkeit tragen, durch diesen Fluß von Energie und Materie bei anderen späteren Übergängen zu noch mehr geordneten, zu noch komplexeren Konfigurationen führen?“

Prozesse der Selbstorganisation von Ordnung und damit auch der Evolution können bei Systemen entstehen, – die offen für den Fluß von Materie und Energie sind,

– die (weit) vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt sind
– und die nicht-linear in den Beziehungen zwischen Flüssen und Kräften sind.

Solche geordneten Strukturen werden „dissipative Strukturen“ genannt, weil sie durch den Entropie erzeugenden dissipativen Prozeß des Flusses erzeugt und erhalten werden.

Biologische Prozesse basieren letztlich auf biochemischen Prozessen und die sind, wie alle chemischen Reaktionen, gewöhnlich nicht-linear. *Prigogine* hat mit seinen Überlegungen die Grundlagen dafür geschaffen, den Übergang von toter Materie zu Lebendem rationell zu erfassen.

Durch den Begriff des Flusses kommt die Zeit als wesentliche Größe wieder in unser Blickfeld. Wir leben in einem Fließgleichgewicht – ein statisches Gleichgewicht ist der Tod.

„Die Aequivalenz der Verwandlungen“ nannte *Clausius* zunächst das, was er später Entropie benannte. „Die Aequivalenz der Verwandlungen“ ist von viel umfassenderer Bedeutung als ursprünglich angenommen; sie ist das Grundprinzip des Lebens.

Möglicherweise wird die Nichtgleichgewichts-Thermodynamik erneut das Tor unserer Erkenntnis um ein außergewöhnliches Maß aufstoßen, so ähnlich, wie es geschah, als die Wahrscheinlichkeit in die Physik eingeführt wurde; vielleicht noch mehr auch auf biologische, soziologische oder wirtschaftliche Zusammenhänge bezogen als damals.

„Zufall oder Notwendigkeit“ heißt das vielbeachtete Buch von *Jacques Monod*, in dem er zu dem Schluß kommt, daß der Zufall in Gestalt von Mutation und die Notwendigkeit, entstehend aus den Gesetzen der natürlichen Auslese, die Ursache für die biologische Evolution und damit für das Leben sei. *Monod* schließt damit wieder an *Darwin* an. Die Thermodynamik irreversibler Prozesse läßt uns den Vorgang der Mutation besser verstehen; das Mysterium der Schöpfung bleibt.

BWK 007