

# Entropie

N.G. van Kampen<sup>1</sup>

**Entropie entartet langsam zu einem Modewort. Literaten, Biologen und Wirtschaftswissenschaftler verwenden es, um ihren Tiefsinnigkeiten eine wissenschaftliche Aura zu verleihen. Aber wer die Physik vor seinen Wagen spannen möchte, hat sich der Disziplin des exakten Formulierens und Denkens zu unterwerfen. Dieser Aufsatz ist ein Versuch den Wildwuchs des Wortes Entropie zu bändigen.**

Zunächst einige Zitate, die den Wildwuchs illustrieren: "*Die innere Entropie kann zu innerer Wärme und zum Reichtum des Goethianismus transformiert werden*" [1] und: "*Love is not anti-entropic, as some would like*" [2]. Solche Phrasen nimmt niemand ernst, aber es gibt Fälle, die einen Anschein von Wissenschaftlichkeit haben. Um sie ausfindig machen zu können, sollte ich zuerst den wahren Inhalt des Begriffes Entropie beschreiben. Ich beschränke mich dabei auf die klassische Theorie. Für die Quantenmechanik ist die Überlegung in einigen unwesentlichen Punkten anzupassen.

1865 entdeckte Clausius, daß ein System (z.B. ein Gas in einem Gefäß oder ein Stück irgendeines Materials) im thermodynamischen Gleichgewicht neben der Temperatur noch eine andere Zustandsgröße besitzt, die er *Entropie* nannte. Anders als die Temperatur ist diese Größe extensiv, d.h. proportional zum Ausmaß des Systems. Daher kann man für ein System, welches als solches nicht im Gleichgewicht ist, aber aus Subsystemen oder Elementen besteht, die jedes für sich im Gleichgewicht sind, die Entropie als Summe aller Entropien dieser Subsysteme definieren. Ein Beispiel ist ein Gas, dessen Dichte örtlich variiert. Die Subsysteme sind Kästchen im Raum, die nicht miteinander im Gleichgewicht sind. Durch ihre Wechselwirkung miteinander (Austausch von Materie und Wärme) ändern sich ihre individuellen Entropien mit der Zeit. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, daß bei dieser Änderung die

---

<sup>1</sup>Dieser Beitrag ist in Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, 62/19 (1996) erschienen und wurde von U.M. Titulaer übersetzt. Der Übersetzer dankt Frau S. Schmidt und Herrn Dr. H. Iro für Verbesserungsvorschläge.

Gesamtentropie immer zunimmt, *vorausgesetzt, das System als Ganzes hat keine Wechselwirkung mit der Außenwelt.*

Boltzmann hat die Definition auf Gase erweitert, die auch lokal nicht im Gleichgewicht sind. Jedem makroskopisch vorgegebenen Zustand des Gases (z.B. einer vorgegebenen Dichteverteilung) ordnete er eine Zahl  $W$  zu, die die Anzahl der Möglichkeiten auf die man die Moleküle in Übereinstimmung mit dieser makroskopischen Vorgabe mikroskopisch anordnen kann, angibt. Für diese Entropie des Makrozustandes schrieb er seine berühmte Formel  $S = k \log W$ .  $S$  ist extensiv, es nimmt, wie man feststellt, in Folge der Bewegungen und Stöße der Moleküle immer zu, und ist, falls doch lokales Gleichgewicht herrscht, mit der früher definierten Entropie identisch. Zum Zweck dieser Identifikation muß der Faktor  $k = R/N$  ( $R$  Gaskonstante,  $N$  Avogadro'sche Zahl), mit dem Wert  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Joule/Kelvin hinzugefügt werden.

Die genaue Definition von  $W$  lautet: Im gesamten Phasenraum aller Moleküle ist  $W$  der Umfang des Gebietes, das durch die Spezifikation des vorgegebenen Makrozustandes abgegrenzt wird. Als Beispiel: Die Vorgabe, daß das Gas sich in der linken Hälfte des Gefäßes befindet, reduziert den Phasenraum um einen Faktor  $(1/2)^N$  und ergibt deshalb eine Entropieerniedrigung  $\Delta S = -R \log 2$ .

Damit ist alles gesagt, was man braucht um zu wissen, was Entropie ist. Oft spürt man aber das Bedürfnis sich für den Hausgebrauch ein anschauliches Bild zu formen. So ein Bild kann zwar zur Illustration der Definition dienen, darf sie aber nicht ersetzen. Dadurch, daß man sich allein auf das Bild verläßt und die eigentliche Definition vergißt, kann man heillose Verwirrung stiften, wie ich an zwei Beispielen zeigen werde.

Man muß zugeben, daß es auch innerhalb der Physik gelegentlich Mißverständnisse gibt, wie sich bei der Behandlung des 3. Hauptsatzes [3] und des Gibbsschen Paradoxons [4] zeigt. Ferner versagt die Definition bei Teilchen mit Gravitationswechselwirkung; wer über die Entropie des Universums redet, sollte zunächst sagen, was er darunter versteht.

### **Ein Maß für Unordnung?**

Ein großes  $W$  bedeutet eine große Freiheit für die Moleküle, was ein Bild großer Unordnung hervorruft. Mit anderen Worten: In dem Ausmaß, in dem

der Makrozustand die Bewegung der Moleküle stärker einschränkt, sind sie mehr geordnet. Das Phasenvolumen  $W$  ist dann klein, also  $S$  niedrig. Daher stammt das Bild der Entropie als ein Maß für Unordnung.

Wer diesem Bild mehr Bedeutung zuerkennt als der richtigen Definition, kann zu beeindruckenden Ergebnissen kommen. Menschen und andere Lebewesen zeigen von ihrer Geburt an eine erstaunliche Zunahme der Ordnung zahlloser Zellen und ihrer Verbindungen untereinander. Daraus wird abgeleitet, daß das Leben im Gegensatz zu toter Materie imstande ist, Entropie abnehmen zu lassen.

In Wirklichkeit jedoch parasitiert ein Lebewesen von der niedrigen Entropie der aufgenommenen Nahrung, die mit erhöhter Entropie wieder ausgeschieden wird. *Erste Warnung:* Wer den 2. Hauptsatz anwenden will, muß es richtig machen. Er gilt für Systeme ohne Wechselwirkung mit dem Rest der Welt. Ein Mensch in einer abgeschlossenen, isolierten Kiste verliert bald seine hochrangige Ordnung.

Diese falsche Vorstellung ist inzwischen zwar überholt, Spuren dieses wiederbelebten Vitalismus trifft man jedoch immer noch an: "*Im Umgang mit Menschen ist es einem gelegentlich vergönnt, das Entropiegesetz durchbrochen zu sehen*" [5]. "*Yet our personal lives also obey the Entropy Law. We go from birth to death*" [2]. "*The Second Law states unequivocally that the entropy of open [sic] systems must increase. Since we are all open systems, this means that all of us are doomed to die*" [6].

*Zweite Warnung:* Die Entropie mißt die Unordnung der Moleküle, definiert als der Logarithmus des ihnen verfügbaren Phasenvolumens. Das ist *nicht* dasselbe wie das, was bei uns im Alltag den Eindruck von Unordnung entstehen läßt. Der Bierschaum in einem Glas besteht aus einer ungeordneten Aufstapelung von Luftbläschen. Spontan gehen diese in eine glatte Flüssigkeit über, bei der keine Unordnung zu erkennen ist. Trotzdem hat die Entropie nicht abgenommen: Im Gegenteil, die Moleküle haben mehr Bewegungsfreiheit bekommen, weil sie nicht länger auf die Zwischenwände der Bläschen beschränkt sind [7]. Was immer der Verfasser der nachfolgenden Prosa meinen möge, auf die Entropie beruft er sich zu Unrecht: "*While the Eastern religions have understood the value of minimizing energy flow and lessening the accumulation of disorder, it is the Western religions that have understood the linear nature of history, which is the other important factor in synthesizing a new religious doctrine in line with the requirements of the*

*Entropy Law*" [2]. Es steht jedem frei, das Wort "Unordnung" zu verwenden, wie ihm der Schnabel gewachsen ist, aber wenn er sich auf das Entropiegesetz beruft, muß er sich an die echte Definition halten. Eine Aufsehen erregende Mitteilung, die sowohl die erste als auch die zweite Warnung in den Wind schlägt, ist: "*The Entropy Law destroys the notion of history and progress*" [2].

### **Mangel an Information?**

Ein anderes verwirrendes Bild entsteht etwa wie folgt: Wenn die makroskopischen Vorgaben wenig Einschränkungen beinhalten, weiß man wenig darüber, wo sich die Moleküle im Phasenraum befinden. Je mehr Vorgaben, desto mehr Information, aber zugleich je kleiner  $W$ , desto niedriger  $S$ . Information entspricht deshalb negativer Entropie.

Diese Aussage ist richtig, vorausgesetzt, man definiert Information auf diese Weise (und dann ist sie eine Tautologie). Sie sagt nichts aus über die Information, von der in einem anderen Zusammenhang oder im täglichen Leben die Rede ist. Darauf läßt sich dann der 2. Hauptsatz auch nicht anwenden. Man darf also nicht sagen: "*Since biological information resides in biological systems and has a physical interpretation, it must be subject to the consequences of the second law*" [8].

*Dritte Warnung:* Selbst wenn man nach Shannon die "Information" einer Mitteilung formal in der Anzahl von bits ausdrückt, ist sie in Relation zur thermischen Entropie wegen der enormen Differenz in der Größenordnung winzig. Das kommt daher, weil die Anzahl der Moleküle so unvorstellbar viel größer ist als jede Anzahl von Objekten in unserer makroskopischen Welt. Ein Buch von 1000 Seiten mit 50 Zeilen à 70 Buchstaben, ausgewählt aus einem Alphabet von 64 Symbolen, bildet einen Phasenraum von  $64^{3500000}$  Punkten. Die "Information", die in einem solchen Buch enthalten ist, entspricht also  $\log W = 3,5 \times 10^6 \log 64$ . Dies mag als eine große Zahl erscheinen, trägt aber zur Thermodynamik nicht bei. Diese beschäftigt sich mit Entropien der Ordnung  $k \log W$ , also in diesem Fall  $S = k \times 3,5 \times 10^6 \log 64 = 8,7 \times 10^{-17}$  Joule/Kelvin. Durch den Verzehr einer Wurstsemmel erhält man unsagbar mehr "Information" als durch das Lesen dieses Artikels.

Dieser Informationsbegriff wird gerne auf die biologische Evolution angewendet. Ein Beispiel ist das nachfolgende Zitat: "*Selektion jedoch bedeutet Beseitigung genetischer Information, während man für echte Evolution, die über*

die Artenebene hinausgeht, 'von der Amöbe zum Menschen', einen starken informationserzeugenden Mechanismus brauchen würde" [9]. Solche Ideen können als Pseudo-Wissenschaft abgetan werden. Daß im Laufe der Jahrtausende der Informationsinhalt der DNA zunimmt, steht nicht in Widerspruch zum 2. Hauptsatz. Die Zunahme der Information ist völlig unbedeutend verglichen mit der enormen Zunahme der Entropie der Umgebung, durch die das Leben aufeinanderfolgender Generationen des Organismus ermöglicht wurde. Der Entropiesatz kann nicht als Argument für oder gegen Darwin angeführt werden.

Der Mißbrauch des Wortes Entropie zur Unterstützung verschwommener Betrachtungen führt zu weiteren unverständlichen Aussagen: "The tendency of institutions to become larger, more complex, and more centralized is the same tendency we see with various forms of technology. The reason for this can be found in the operation of the Entropy Law" [2]. "Christliche Theologen glauben, aus der Entropie auf die Endlichkeit der Welt und dadurch auf das Dasein Gottes schließen zu können" [10]. "Ich kann mir übrigens bessere Gründe vorstellen, ferne Länder kennenzulernen, ehe sich die allgemeine Kulturentropie vollzogen hat" [5].

Niemand lasse sich von solch unbedarftem Gebrauch des Wortes Entropie beeindrucken. Es zeigt nur, wie wenig der Verfasser begriffen hat, was Entropie und Wissenschaft sind. Mir wird angst und bange, wenn die Universität Amsterdam für einen Kurs mit den Worten wirbt "Das Thema Entropie, Evolution und Intelligenz wird sowohl aus naturwissenschaftlicher als auch gesellschaftswissenschaftlicher Sicht beleuchtet, von der Physik und Astronomie bis zur Psychologie und Ökonomie". Pseudowissenschaft als Köder für Studenten?

## Literatur

- [1] A. Burnier, zitiert von M. 't Hart in: *De vrouw bestaat niet* ('Die Frau gibt es nicht') (Arbeiderspers, Amsterdam, 1982).
- [2] J. Rifkin and T. Howard, *Entropy, A New World View* (Granada Publ., London, 1985).
- [3] H. Casimir, *Zeits. für Physik* **171**, 246 (1963).

- [4] N.G. van Kampen in: *Essays in Theoretical Physics in honour of Dirker Haar*, Herausg. W.E. Parry (Pergamon Press, Oxford, 1984).
- [5] R. Rubinstein, *Wat Vliegt de Tijd* ('Wie verfliegt doch die Zeit!') (Meulenhof, Amsterdam, 1992).
- [6] J.E. Lovelock, Gaia, *A New Look at Life on Earth* (Oxford University Press, 1987).
- [7] J. Zernike, *Entropy* (Kluwer, Deventer, 1972).
- [8] B.H. Weber et al. (Herausg.), *Entropy, Information, and Evolution* (MIT Press, Cambridge, Mass., 1988), p. 177.
- [9] J. Bruinsma, in NRC-Handelsblad (15-8-1995).
- [10] *Philosophisches Wörterbuch* (Kröner Verlag, Stuttgart, 1969), p. 139.

### **Zur Erinnerung: Der Phasenraum**

In der Mechanik ist der Zustand eines Systems festgelegt, wenn man Ort und Geschwindigkeit (Impuls) für alle Teilchen kennt (zumindest für sogenannte Punktteilchen ohne Ausdehnung oder innere Struktur). Für ein einziges Teilchen, das sich in nur einer Dimension (Raumrichtung) bewegt, kann man Ort und Impuls (Geschwindigkeit) zu einem gegebenen Zeitpunkt als die  $x$ - und die  $y$ -Koordinaten eines Punktes in der sogenannten *Phasenebene* betrachten. Für ein System aus  $N$  Teilchen, die sich in drei Dimensionen bewegen können, wird aus der Phasenebene der  $6N$ -dimensionale *Phasenraum*. Makroskopische Angaben über den Zustand eines Systems aus vielen Teilchen (wie ein Gas oder Festkörper) legen den mikroskopischen Zustand (bestehend aus den Phasenraumkoordinaten aller Teilchen) nicht fest, sondern bedeuten nur, daß der Phasenpunkt in einer gewissen Teilmenge des Phasenraumes liegen muß. Das ( $6N$ -dimensionale) Volumen dieses Teilgebietes heißt das *Phasenraumvolumen*, das dem makroskopischen Zustand entspricht.

### **Zum Autor:**

Dr. Nico G. van Kampen ist emeritierter Professor für theoretische Physik an der Universität Utrecht (Niederlande). Er ist ein weltweit anerkannter Fachmann für statistische Mechanik. N.G. van Kampen studierte in Leiden und promovierte dort bei H.A. Kramers. In seiner Doktorarbeit wendete er

die Ideen von Kramers über Renormierung auf die Kopplung eines Atoms an die Schwingungsmoden des Strahlungsfeldes an; die Kopplung führt zu einem typischen, unumkehrbaren Prozeß, dem spontanen Zerfall von angeregten Zuständen. Die Herleitung eines irreversiblen Vorganges aus einem mechanischen Modell ist eines der Grundprobleme der statistischen Physik, welches schon Ludwig Boltzmann beschäftigte. Die Leidener Tradition in der statistischen Physik geht auf den gebürtigen Österreicher Paul Ehrenfest zurück, der dort von 1912 bis 1933 lehrte. Ehrenfest, einer der letzten Schüler Boltzmanns, trat sehr für die Verbreitung und Erklärung der Ideen Boltzmanns ein. Auch van Kampen hat sich in zahlreichen Veröffentlichungen mit den begrifflichen Grundlagen der statistischen Physik auseinandergesetzt.