

# 210 Die Entropie des Universums

## ZUSAMMENFASSUNG

Um den Entropiesatz zu formulieren, bezieht man sich oft auf das Universum: Die Entropie des Universums kann nur zunehmen. Eine solche Formulierung ist aber kaum zu verifizieren, und der zweite Hauptsatz wird einfacher und klarer wenn man ihn lokal, d. h. mit einer Kontinuitätsgleichung formuliert.

## Gegenstand

Man ist den größten Teil des Studiums ohne den Kosmos ausgekommen. Aber dann kommt er endlich: in der Thermodynamik – die Thermodynamik scheint ihn zu brauchen. So findet man den 2. Hauptsatz in einem Lehrbuch für die Hochschule:

*Bei einem reversiblen Prozess ist die Entropieänderung des Universums gleich null. Unter „Universum“ verstehen wir die Gesamtheit von System und Umgebung.*

*Bei einem irreversiblen Prozess nimmt die Entropie des Universums zu.*

*Es gibt keinen Prozess, durch den die Entropie des Universums abnimmt.*

Oder in einem Schulbuch:

*Die Entropie des Universums nimmt ständig zu oder ändert sich nicht mehr.*

Oder in Wikipedia unter dem Stichwort *Exergone und endergone Reaktion*:

*Triebkraft für das Ablaufen einer chemischen Reaktion ist die Zunahme der Entropie  $S$  im Universum...*

## Mängel

1. Die Frage, wie es mit der Entropie des Universums steht, ist schwierig, und man sollte sich in einem so schlichten Kontext wie dem 2. Hauptsatz vielleicht lieber nicht auf das verminten Gebiet der Thermodynamik des Kosmos begeben. Um von der Entropie des Universums zu sprechen, müsste man ja die Beiträge aller Teile des Universums aufsummieren. Aber wie macht man das? Die Entropie, die alle Teile *jetzt* haben? Dann ist die Frage, wie man über die Gleichzeitigkeit weit entfernter Raumzeitpunkte entscheidet.

2. Nehmen wir an, die Größe des Universums sei unendlich. (Diese Vorstellung ist zwar etwas metaphysisch, aber offenbar hat damit kaum jemand ein Problem.) Dann entsteht das Problem, dass die Entropie auch unendlich ist, und folglich auch schon immer unendlich gewesen sein muss. Kann sie dann noch zunehmen? Gewiss kann sie das. Man muss es nur lokal formulieren, aber das heißt eben ohne das Universum. Schon 1897 weist Planck [1] in seiner *Thermodynamik* darauf hin, dass die Entropie des Universums „nicht zu definieren ist“.

3. Warum muss das Universum ausgerechnet bei der Formulierung des Entropiesatzes, nicht aber bei der Formulierung der Erhaltung der elektrischen Ladung oder des Impulses oder der Baryonenzahl erhalten?

Warum formulieren wir nicht etwa:

*Es gibt keinen Prozess, durch den sich die elektrische Ladung des Universums ändert.*

Die Antwort ist klar: Weil es viel einfacher geht.

4. Auch hier wird die Vorstellung befördert, die Entropie sei eine besonders transzendente Größe. Die Entropie braucht wieder einmal eine Extrawurst.

## Herkunft

Schon in ihren Anfängen kam man auf die Idee, die Frage nach der Bedeutung der Entropie für die Entwicklung des „Weltalls“ zu stellen. Aufgebracht wurde sie wohl von W. Thomson [2]. Clausius [3] bemerkt 1865 dazu:

*„... Die Anwendung dieses Satzes [des zweiten Hauptsatzes] auf das gesamte Weltall führt zu einem Schlusse, auf den zuerst W. Thomson aufmerksam gemacht hat, und von dem ich schon in einer vor Kurzem veröffentlichten Abhandlung gesprochen habe. Wenn nämlich bei allen im Weltall vorkommenden Zustandsänderungen die Verwandlungen von einem bestimmten Sinne diejenigen vom entgegengesetzten Sinne an Größe übertreffen, so muß der Gesamtzustand des Weltalls sich immer mehr in jenem ersteren Sinne ändern, und das Weltall muß sich somit ohne Unterlaß einem Gränzzustande nähern.“*

(Clausius benutzt die Bezeichnung „Verwandlung“ für die Größe, die er später auf den Namen Entropie taufte.)

Aus damaliger Sicht schienen diese Bemerkungen noch unproblematisch, denn niemand konnte ahnen, in was für einen schwierigen Kontext die Aussagen durch die Allgemeine Relativitätstheorie und die moderne Kosmologie gestellt werden würden. Auch die Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz lokal d. h. durch eine Kontinuitätsgleichung auszudrücken, lag noch weit in der Zukunft. Die lokale Entropiebilanz wurde erstmals 1911 durch Jaumann [4] formuliert.

## Entsorgung

Auch in diesem Zusammenhang empfehle ich den Ratschlag von Wheeler zu beherzigen: „Physics is simple only when analyzed locally“.

Wenn es darum geht, die Größe Entropie zu charakterisieren, so genügt es zu sagen: Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Diesen Satz versteht jeder.

Wenn man es mathematischer möchte, so schreibt man die lokale Bilanzgleichung (= Kontinuitätsgleichung) auf [4]:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \operatorname{div} j_s = \sigma_s$$

( $\rho_s$  = Entropiedichte,  $j_s$  = Entropiestromdichte,  $\sigma_s$  = Dichte der Erzeugungsrate), und merkt an, dass der Erzeugungsterm auf der rechten Seite nie negativ ist.

[1] M. Planck: *Vorlesungen über Thermodynamik*, Verlag von Veit & Comp. Leipzig 1897, S. 94.

[2] W. Thomson: *On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 4, 1852, S. 306. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786445208647126>

„Within a finite period of time past the earth must have been, and within a finite period of time to come the earth must again be, unfit for the habitation of man as at present constituted, unless operations have been, or are to be performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject.“

[3] R. Clausius: *Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik und Chemie, Band CXXV, No. 7, S. 397-400.

[4] G. Jaumann: *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Mat.-Naturw. Klasse, Abt. IIA 120, 1911, S. 385-530.