

Joachim Stiller

Philosophie der Physik I  
Was ist Entropie?

Copyright by Joachim Stiller  
Alle Rechte Vorbehalten

# Vom richtigen Bilden physikalischer Begriffe: Die Thermodynamik

## Der erste Hauptsatz der Thermodynamik

Zunächst einmal gilt das Wärmeäquivalent. Es wurde unabhängig voneinander von Mayer 1840 und Joule 1848 bestimmt und lautet wie folgt:

Wärme ist eine Energieform, Sie kann aus mechanischer Arbeit erzeugt und in solche umgewandelt werden.

Der durch die Erfahrung immer wieder bestätigte erste Hauptsatz der Thermodynamik ist, nachdem man die Gleichheit von Wärme und Arbeit erkannt hat, nur die Anwendung des Prinzips der Erhaltung der Energie auf die Wärmeerscheinungen. Er kann daher nach Joule wie folgt ausgedrückt werden:

**Erster Hauptsatz: Es gibt keine Maschine, die dauernd Arbeit erzeugt, ohne dass ein gleichwertiger Betrag anderer Arbeit verschwindet.**

Eine solche Maschine bezeichnet man als Perpetuum mobile erster Art oder Ordnung. Der **Erste Hauptsatz behauptet also: Ein Perpetuum mobile erster Ordnung ist unmöglich.**

Der erste Hauptsatz bleibt auch in der Umkehrung richtig und lautet dann:

Es gibt keine Maschine, die dauernd Energie vernichtet, ohne dass ein gleichwertiger Betrag anderer Energie entsteht. Dies entspricht im Prinzip dem Energieerhaltungssatz der Mechanik.

## Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Bisher hatten wir die Richtung der betrachteten thermodynamischen Vorgänge nicht besonders unterschieden, vielmehr unbedenklich angenommen, dass jeder Vorgang, z. B. die Volumenänderung eines Gases in einem Zylinder, sowohl in der einen Richtung (als Expansion) als auch in der anderen Richtung (als Kompression) vor sich gehen kann. Auch bei Kreisprozessen können wir den Umlaufsinn ohne weiteres ändern. Die Vorgänge der Mechanik sind, soweit keine Reibung mitspielt, generell von dieser Art und werden daher als **umkehrbar oder reversibel** bezeichnet. Wir können sagen:

Ein reversibler Vorgang besteht aus lauter Gleichgewichtszuständen, derart, dass eine beliebig kleine Kraft je nach ihrem Vorzeichen den Vorgang sowohl in der einen Richtung, wie auch in der anderen Richtung auslösen kann.

Außer diesen umkehrbaren Vorgängen gibt es aber erfahrungsgemäß noch solche, die man als **nicht umkehrbar oder irreversibel** bezeichnet.

Die Reibung der Mechanik ist ein solcher, nicht umkehrbarer Vorgang. Da bei den meisten Vorgängen der Mechanik Reibung auftritt, sind sie also genau genommen nicht vollständig umkehrbar. Die Erfahrung zeigt, dass Wärme wohl ohne unser Zutun von einem Körper höherer Temperatur auf einen solchen niedrigerer Temperatur übergeht, aber niemals tritt der umgekehrte Fall ein, d.h. Temperaturunterschiede gleichen sich wohl aus, aber sie entstehen nicht von selbst. Diese Erfahrung von dem Vorkommen nicht umkehrbarer Vorgänge bezeichnet man als den **zweiten Hauptsatz der Thermodynamik**, den Claudius 1850 zuerst erkannt hat. Er lautet wie folgt:

**Zweiter Hauptsatz: Wärme kann nie von selbst von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.**

Ein Vorgang, der sich vollständig wieder rückgängig machen lässt, ist umkehrbar oder reversibel, ein Vorgang, bei dem dies nicht der Fall ist, ist hingegen nicht umkehrbar oder irreversibel. Außer der obigen Fassung des zweiten Hauptsatzes gibt es noch andere, auf die wir jetzt eingehen wollen, und die trotz ihrer verschiedenen Gestalt damit übereinstimmen und sich daraus ableiten lassen.

## **Die Reibung**

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik hatte die Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit behauptet, wobei eine Einschränkung über die Umwandlung von Wärme in Arbeit weder in der einen, noch in der anderen Richtung gemacht wurde. Die Aussage des Satzes kann man also umkehren.

Die Erfahrung zeigt aber, dass man zwar Arbeit beliebig, z.B. durch Reibung, in Wärme umwandeln kann, dass aber der umgekehrten Umwandlung von Wärme in Arbeit gewisse Grenzen gesetzt sind. Man kann z.B. nicht Arbeit aus der Wärme des Meeres gewinnen, wobei nichts anderes geschieht, als dass ein Teil des Meeres sich abkühlt. Es ist also unmöglich, den praktisch unerschöpflichen Wärmeverrat der Ozeane zu benutzen, um damit Schiffe anzutreiben.

Eine Maschine, die Arbeit aus dem Nichts erzeugt, hatten wir Perpetuum mobile erster Ordnung genannt, und den ersten Hauptsatz auch als die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile erster Ordnung ausgesprochen. Als Perpetuum mobile zweiter Ordnung bezeichnet man eine Maschine, die nur durch Abkühlung eines Körpers Arbeit erzeugt. Eine solche Maschine würde dem Energieprinzip ja nicht widersprechen, da ja für die entstandene mechanische Energie ein entsprechender Betrag an Wärmeenergie verschwunden ist. Trotzdem ist eine solche Maschine unmöglich. Wir können den zweiten Hauptsatz nun auch so formulieren:

Es ist keine Maschine möglich, die einem Wärmebehälter Wärme entzieht und in Arbeit verwandelt, ohne dass mit den beteiligten Körpern noch andere Veränderungen vorgehen. Oder wir können sagen:

Es ist auf keinen Fall möglich, einen Vorgang, bei dem Wärme durch Reibung entsteht, vollständig rückgängig zu machen.

## **Die Entropie**

In einem abgeschlossenen System hat man drei Arten von Vorgängen zu unterscheiden: umkehrbare, nicht-umkehrbare und unmögliche. Haben wir einen Anfangszustand, so lassen sich beliebige Folgezustände konstruieren. Bei den umkehrbaren Vorgängen sind alle Zustände gleich wahrscheinlich, bei den nicht-umkehrbaren Vorgängen sind die Zustände von höherer Wahrscheinlichkeit.

Die Entropie ist nun das Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes.

Bei allen umkehrbaren Vorgängen bleibt die Entropie konstant, bei allen nicht-umkehrbaren Vorgängen nimmt sie zu, da es um so unwahrscheinlicher wird, dem Anfangszustand wieder näher zu kommen, je weiter der Vorgang voranschreitet.

Der zweite Hauptsatz kann nun auch als das Prinzip von der Zunahme der Entropie bezeichnet werden: Die Summe der Entropie aller an einem Vorgang beteiligten Körper nimmt stets zu, nur im Grenzfall der reversiblen Vorgänge bleibt sie ungeändert.

Eine Abnahme der Entropie könnte nur bei der Umkehrung nicht-umkehrbarer Vorgänge auftreten, und das ist unmöglich. Die Entropie der Welt strebt einem Höhepunkt zu. Die Energie der Welt ist hingegen eine konstante Größe.

Ich hoffe, es ist deutlich geworden, dass die Entropie nicht „Chaos“ oder „Unordnung“ meint, und steigende Entropie meint demnach nicht „wachsende Unordnung“, oder „Zerfall ins Chaos“. Es handelt sich dabei nur um ein gewaltiges Missverständnis.

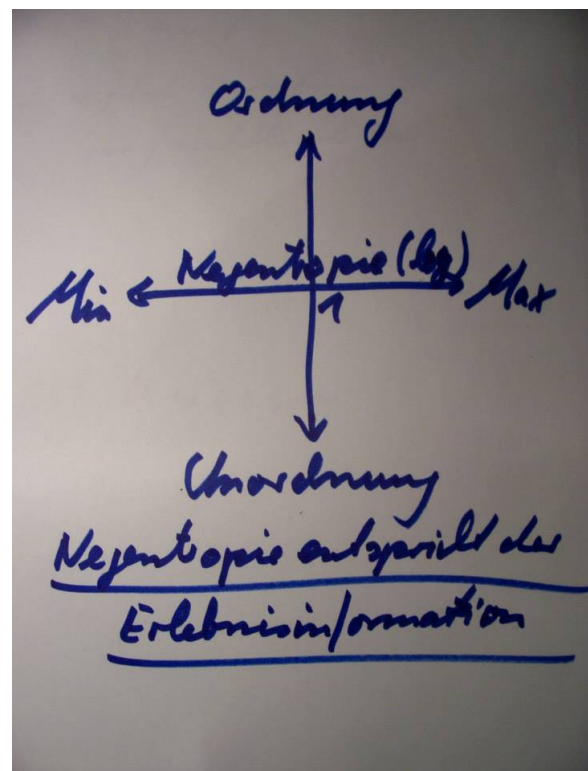
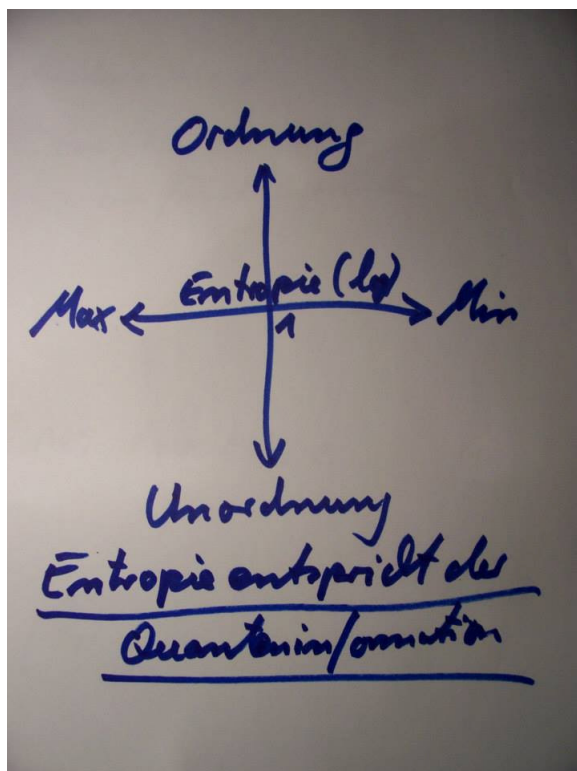
Vorgänge steigender Entropie, also nicht-umkehrbare Vorgänge, können sowohl ein Mehr an „Chaos“, als auch ein Mehr an „Ordnung“ bedeuten. Für beides lassen sich Beispiele finden. Ein homogenes Gas bedeutet Ordnung, eine zerbrochene Tasse als Endzustand bedeutet Unordnung. Das hängt eben ganz von der Betrachtungsweise ab. Ich selber glaube, dass sich Chaos und Ordnung gegenseitig bedingen. Aber das hat eben nichts mit Entropie oder steigender Entropie zu tun. Leider wird dies von vielen Physikern heute immer noch nicht in vollem Umfang verstanden.

# Was ist Entropie?

Entropie bedeutet "nicht" Unordnung wie die meisten Menschen glauben, die den Begriff Entropie verwenden... Entropie ist völlig unabhängig von Ordnung und Unordnung. So lassen sich jeder Zeit Beispiele finden für System maximaler Entropie, die zugleich ein Höchstmaß an Ordnung aufweisen. Beispiele wären ein Gefäß mit einem idealen Gas oder eine Schüssel mit zur Ruhe gekommenem Wasser.

Zu welchen krassen Missverständnissen die unsinnige Gleichsetzung von Entropie und Unordnung führen kann, zeigt das folgende Video von Harald Lesch: [Link 1](#)

Also noch einmal: Entropie ist das Maß für die Wahrscheinlichkeit, die der Zustand eines physikalischen System einnehmen kann... Dabei kann die Entropie immer nur entweder gleich bleiben, oder größer werden, aber niemals kleiner. Bekenstein setzt nun die Entropie mit dem gleich, was er (abstrakte) Quanteninformation nennt. Das ist eine Information, die nicht mehr, wie die Erlebnisinformation, Träger von "Sinn und Bedeutung" (Ulrich Warnke) ist. So wie der Entropie die (abstrakte) Quanteninformation zugeordnet ist, müsste man der wieder einzuführenden Negentropie die (konkrete) Erlebnisinformation zuordnen... Ich stelle es gleich einmal in zwei Graphiken dar..



## Zitat wishmoep:

Puh,

schauen wir uns doch die irreversible thermische Expansion eines idealen Gases an. Also bspw. einen isolierten Kasten mit einer Wand dazwischen, wodurch wir zwei Bereiche, A und B, haben. Befindet sich das Gas nur in A haben wir eine gewisse Ordnung, die sich dadurch manifestiert, dass in A Gas ist und in B eben nicht. Entfernen wir die Wand, breitet sich das Gas im ganzen Raum aus und befindet sich damit in mehr oder minder gleichen Teilen in A und B, wodurch wir diese anfängliche "Ordnung", also die Trennung in A und B nicht mehr haben. Damit haben wir gewissermaßen Unordnung geschaffen.

Die Entropie hängt darüber hinaus mit der Wahrscheinlichkeit für einen Mikrozustand zusammen, ja, aber sie ist eben auch eine makroskopische Größe. Ein thermodynamisches System besteht ja aus [extrem] vielen Teilchen und Objekten, sodass man nicht mehr einen genauen Mikrozustand beschreibt (Also Teilchen 1 in Zustand A, Teilchen 2 in Zustand B usw.), sondern verschiedene solcher Mikrozustände zusammenfasst, wenn sie bspw. die gleiche Energie aufweisen (bei bestimmten fixen äußeren Parametern).

Das ist dann unser Makrozustand. Jetzt ist noch wichtig, welches Ensemble wir betrachten: 1. mikrokanonisch, 2. kanonisch, 3. großkanonisch.

1. vollständig isoliertes System, unabhängige Variablen sind E, V und N
2. System mit Energieaustausch, unabhängige Variablen sind T, V, N (nicht mehr die Energie, da wir ja einen Austausch haben)
3. System mit Energie- und Teilchenaustausch, unabhängige Variablen sind T, V,  $\mu$

Was ist jetzt die Entropie? Per definitionem (und andere "Interpretationen" brauchen wir erstmal nicht anschauen): ... wobei ... ie jeweilige Dichtematrix ist (und Tr die Spur über die Matrix).

Du kannst die mikrokanonische Zustandssumme auf zwei Wegen ausdrücken, einmal quantenmechanisch (also wenn wir ein qm-System haben, bspw. Spins im B-Feld) und einmal klassisch. Klassisch ist recht lahm und dort ist ... wobei  $H$  der Hamiltonian des Systems ist und  $\Omega = \text{Tr} \delta(E - H)$  eine Normierung.


Quantenmechanisch kommen wir der von dir gemeinten Zustandswahrscheinlichkeit schon näher, denn dann ist die Dichtematrix anschaulich als Matrix gegeben:

also als Summe über alle möglichen Zustände (in Matrixform, bzw. Diagonalelemente einer Matrix) gewichtet mit der Wahrscheinlichkeit für das System, in diesem Zustand zu sein.

Die oben definierte Entropie ist damit (Spur über, j, die Summe über alle Diagonalelemente der Matrix in der Basis der Zustände):

Was (da eigentlich alles diagonal ist) zu ... wird.

Zur Vereinfachung können wir einmal annehmen, dass alle Zustände gleichwahrscheinlich sind, damit ist die einzelne Wahrscheinlichkeit dann  $P = 1/\Omega$ , dadurch vereinfacht sich die Entropie zu  $S = k \ln \Omega$ . Und das  $\Omega$  ist letztlich die Zahl der für das System realisierbaren Quantenzustände. Die Entropie kann also in der Tat als ein Maß für den Informationsgehalt der Dichtematrix verstanden werden (Shannon-Entropie, wenn ich mich nicht irre, das was die Informatiker daraus gemacht haben).

Dein Ansatz, dass Entropie Quanteninformation ist, ist daher falsch, aber nicht völlig , denn sie stellt ja ein Maß für den Informationsgehalt eines Ensembles dar. Nur beschreibt sie nicht den Mikrozustand des Ensembles, sondern den des Makrozustandes, also des "größeren Ganzen".

Hoffe das war hinreichend verständlich.

**Antwort:**

"...schauen wir uns doch die irreversible thermische Expansion eines idealen Gases an. Also bspw. einen isolierten Kasten mit einer Wand dazwischen, wodurch wir zwei Bereiche, A und B, haben. Befindet sich das Gas nur in A haben wir eine gewisse Ordnung, die sich dadurch manifestiert, dass in A Gas ist und in B eben nicht. Entfernen wir die Wand, breitet sich das Gas im ganzen Raum aus und befindet sich damit in mehr oder minder gleichen Teilen in A und B, wodurch wir diese anfängliche "Ordnung", also die Trennung in A und B nicht mehr haben. Damit haben wir gewissermaßen Unordnung geschaffen." (wishmoep)

Nein eben nicht.. 1. Stadium: Trennung zwischen A und B: Ideales Gas in A. 2. Stadium: Entfernung der Trennwand: Sichverteilen des Gases: Großes Durcheinander. 3. Stadium: Im Gesamtraum stellt sich wieder ein Ideales Gas mit der gleichen Ordnung wie im 1. Stadium ein jetzt aber mit etwas höherer Entropie... Die Ordnung hat keineswegs abgenommen, sondern es hat sich die gleiche Ordnung eingestellt wie im 1. Stadium..

2. Beispiel: Eine Schüssel mit sich in Ruhe befindlichem Wasser hat hohe Entropie denn von alleine wird sich der Zustand des rein physikalisch Systems nicht ändern. Nun gieße ich etwas Farbstoff, sagen wir Tinte in das Wasser: Es entsteht große Unordnung bei physikalisch gleicher Entropie... Der Farbstoff wird sich durch die Verteilungskräfte gleichmäßig verteilen. Am Ende wird der Farbstoff gleichmäßig verteilt sein, das Wasser sogar fast wieder ganz klar sein...(Bitte ausprobieren)... Die Ordnung ist wieder hergestellt, und das, obwohl die physikalische Entropie die ganze Zeit gleich blieb...

3. Beispiel: In einer Lava entsteht eine Gasblase mit idealem Gas von hohem Druck.... Die Lava kühlt nu ab, und in dieser Gasblase der, sogenannten Drusen, entstehen schöne regelmäßige Kristalle... Ein Höchstmaß an Ordnung, wie jeder bestätigen wird, und ein Höchstmaß an Entropie zugleich... Das muss man doch auch mit verquastem physikalischem Verstand irgendwie verstehen können, finde ich...

Schmeißt endliche Eure Lehrbücher in den Müll... Die taugen nichts...

Ma eine bescheidene Frage, aber stammt die Gleichsetzung von Entropie und Unordnung vielleicht aus der pseudoesoterischen Hexenküche der Hippies... Und aus so etwas fällt die Physik rein?

Noch einmal meine These: Entropie hat nicht das Geringste mit Ordnung oder Unordnung zu tun!!!

**Nachtrag.**

Shannon sollten wir übrigens außen vor lassen... Das ist Kommunikationstheorie und hat mit "Quanteninformation" nichts zu tun, sondern nur mit "Erlebnisinformation" (David Chalmers).

### **Zitat wishmoep:**

Wenn du das so liest, hast du nicht gelesen, oder alternativ nicht verstanden, was ich geschrieben habe.

Wenn die Hälfte meines Schreibtischs unordentlich ist, die andere Seite dafür aufgeräumt, dann ist er durchaus ordentlicher, hat also einen höheren Ordnungsgrad als wenn er vollständig unordentlich ist. Er hat nämlich dann einen Ordnungs- bzw. Unterscheidungsgrad mehr. Wenn du das nicht akzeptierst, kann man hier auch schließen. Punkt.

### **Antwort:**

Doch wishmoep, natürlich akzeptiere ich das und ich habe auch nie etwas anderes behauptet... Nur wenn Du ein Kartenspiel "psychologisch" geordnet auf den Tisch legst. oder alle Karten durcheinander, so ist die Entropie des rein physikalischen Systems in beiden Fällen exaktente die gleiche... Es geht nur darum, dass Entropie nichts mit Ordnung oder Unordnung zu tun hat... Die Entropie ist unabhängig von Ordnung oder Unordnung... Sieh es ein, wishmoep, aber nicht ich bin hier esoterisch sondern die Physik... Max Plack würde sich im Grabe umdrehen...

Leiten wir den Begriff der Entropie doch einmal ganz klassisch her... Dazu hänge ich gleich einen Text zum "richtigen Bilden physikalischer Begriffe" am Beispiel der Thermodynamik an. Noch in den 60er Jahren war das Stand der Wissenschaft. Die Physik hat ab einem bestimmten Zeitpunkt einfach den rechten Weg der Tugend verlassen....

Hier vielleicht noch eben der Wiki-Artikel zum Vergleich: **Link 2**

In schwarzen Löchern wird die Entropie sehr groß und auch die Information bzw. Quanteninformation wird sehr groß. Daraus zog Bekenstein den irrigen Schluss, die Information sei gleich der Entropie. Tatsächlich ist die Information aber gleich der Negentropie:

### **Information = Negentropie**

Und die Entropie ist dann tatsächlich nur die Wahrscheinlichkeit des Zustands physikalischer System. Die Entropie wird zu einer reinen Zustandsfunktion...

Joachim Stiller

Münster, bis 2015

Ende

Zurück zur Startseite