Thermodynamik und Nachhaltigkeit

Niels Provos

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Dieses Referat beschäfigt sich mit dem thermodynamischen Begriff der Entropie und dessen Anwendung auf Wirtschaftsabläufe, ferner wird versucht, die Entropie als Variable in Schadensfunktionen darzustellen.

1 Einleitung

Da die Thermodynamik fast alle Lebensvorgänge betrifft, möchte ich im Rahmen des Proseminars *Nachhaltigkeit aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht* einen möglichen Zusammenhang zwischen der Thermodynamik und der Nachhaltigkeit aufführen. Insbesondere soll der Begriff der Entropie als Variable in Schadensfunktionen eingeführt werden.

2 Einführung in die Thermodynamik

Die Thermodynamik ist eine phänomenologische Theorie und bedeutet die Lehre von der bewegten Wärme. Es handelt sich also um Umwandlungsprozesse, an denen Wärme beteiligt ist. Damit betrifft die Thermodynamik fast alle Lebensvorgänge.

Die zentralen Begriffe der Thermodynamik sind **Temperatur** und **Wärme** [Nol93, Kuh82]. Dabei versteht man unter Wärme die ungeordnete Bewegungsenergie von Teilchen. Diese Begriffe lassen sich nur sinnvoll auf Viel-Teilchen-Systeme mit in der Regel $> 10^{23}$ Teilchen anwenden. Das entspricht ungefähr $3l$ Luft oder $3g$ Wasser.

2.1 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz lautet

$$dU = \delta Q + \delta W. \tag{1}$$

dU bezeichnet die Änderung der inneren Energie, δQ die Änderung der Wärmeenergie und δW die dem System zugeführte Arbeit. Er bedeutet, daß Wärme eine Energieform ist, und der Zuwachs an innerer Energie gleich der Wärmezufuhr in das System plus der geleisteten Arbeit am System ist.

> Energie kann weder erzeugt noch zerstört werden.

Aber Energie kann umgewandelt werden. Es gibt Energieumwandlungen deren theoretischer Wirkungsgrad im Prinzip 100% beträgt. Zum Beispiel:

- Bei einer Gasheizung wird die chemische Bindungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt. Für Öl- und Gasheizungen betrug der Wirkungsgrad η früher (ca. 1977) 70% und heute ist $\eta \geq 90\%$ [Bor77].

- Bei einem Wasserkraftwerk wird die kinetische Energie des fallenden Wassers über den Umweg der Rotationsenergie in Strom umgewandelt. Der Wirkungsgrad η beträgt hier $\approx 95\%$.

2.2 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Der zweite Hauptsatz behandelt die Umwandlung von Wärmeenergie in andere Energieformen.

> Es ist unmöglich, Wärme vollständig in andere Energieformen umzuwandeln.

Es wäre sehr nützlich die Wärmeenergie, zum Beispiel die Schwingungen in Molekülen, in Arbeit umzuwandeln, natürlich unter Berücksichtigung der Energieerhaltung. Der Physiker Carnot nahm allerdings an, daß es unmöglich sei, Wärmeenergie bei einer einzelnen Temperatur abzuziehen. Wenn die gesamte Erde sich auf derselben Temperatur befände, könnte man überhaupt keine Wärme mehr in Arbeit umwandeln.

Clausius formulierte den zweiten Hauptsatz wie folgt:

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die lediglich einem kälteren Wärmebad Wärme entzieht und diese einem heißeren Wärmebad zuführt.

Ein Eisenstab, der an einem Ende erhitzt wird, gleicht die Temperatur nach einiger Zeit aus. Dabei wird aber nie beobachtet, daß er an einem Ende kalt wird und am anderen anfängt zu glühen. Dies führt zur Festlegung einer Zeitrichtung.

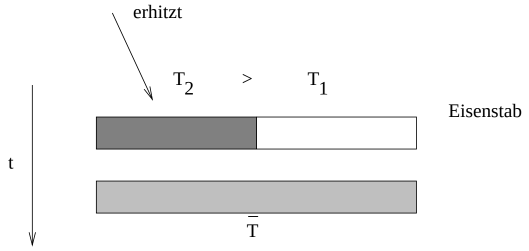

Abbildung 1: Temperaturausgleich beim Eisenstab.

Man stelle sich zwei Gasbehälter vor, die durch ein Ventil verbunden sind. Der eine sei mit Gas gefüllt und der andere vollständig leer. Beim Öffnen des Ventils diffundiert das Gas und verteilt sich gleichmäßig auf beide Behälter.

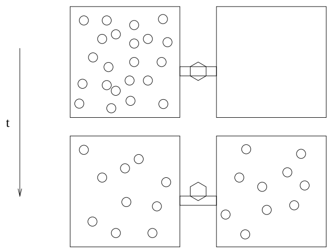

Abbildung 2: Ausdehnung eines Gases.

Der erste Hauptsatz läßt sich in

$$dU = TdS - pdV$$

umschreiben. $-pdV$ entspricht der Energieänderung durch Komprimierung oder Expansion des Gases und TdS der Wärmeenergie. T bezeichnet die Temperatur. Sie ist ein Index für die Klasse koexistenzfähiger Systeme. Teilsysteme sind genau dann koexistenzfähig, wenn sich ihr Zustand bei Wärmekontakt nicht ändert. Über die Temperatur kann eine Ordnungsrelation definiert werden, die die Unterscheidung zwischen *heiß* und *kalt* ermöglicht. S ist eine von Clausius postulierte Größe namens **Entropie**.

Wie ändert sich jetzt diese neue Größe S ? Welche Eigenschaften der Entropie lassen sich ableiten ?

Unter Berücksichtigung der idealen Gasgleichung, N bezeichnet die Anzahl der Teilchen im betrachteten System und k_B die Boltzmann-Konstante,

$$pV = Nk_BT$$

und der Tatsache, daß die innere Energie dU und die Temperatur des Gases sich nicht geändert haben, folgt

$$0 = dU = TdS - pdV = TdS - \frac{Nk_BT}{V}dV$$

und damit folgt für die Entropieänderung dS

$$\Rightarrow dS = \frac{Nk_B}{V}dV \tag{2}$$

Für die Änderung der Entropie wird das Integral

$$\begin{aligned} S_{V_1+V_1} - S_{V_1} &= Nk_B \int_{V1}^{V_1+V_2} \frac{1}{V}dV \\ &= Nk_B \ln \frac{V_1+V_2}{V_1} > 0 \end{aligned}$$

betrachtet. Die Entropie ist also gestiegen. Der zweite Hauptsatz läßt sich nun auch als

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \tag{3}$$

schreiben oder in Worten

Die Entropie des Universums wächst ununterbrochen an [FLS87].

Weiterhin gilt, daß die maximale Arbeit einer Maschine gleich der Differenz von aufgenommener und abgegebener Wärme ist. Der maximale Wirkungsgrad η einer Wärmekraftmaschine ergibt sich damit aus

$$dA = dU_1 - dU_2 = (T_1 - T_2)dS$$

zu

$$\eta = \frac{dA}{dU_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1 \tag{4}$$

Der Wirkungsgrad η beträgt z.B. für ein Kraftwerk mit den Arbeitstemperaturen von 250^0C und 20^0C:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{250^0C - 20^0C}{250^0C} \\ &= \frac{523,2K - 293,2K}{523,2K} = 44\% \end{aligned}$$

Bisher wissen wir über die Entropie, daß sie in abgeschlossenen Systemen konstant bleibt oder kontinuierlich ansteigt. Boltzmann hat festgestellt, daß die **Entropie** ein Maß für die Ordnung eines Systems darstellt. Je höher die Ordnung, desto niedriger die Entropie, je geringer die Ordnung, desto höher die Entropie. Daraus folgt:

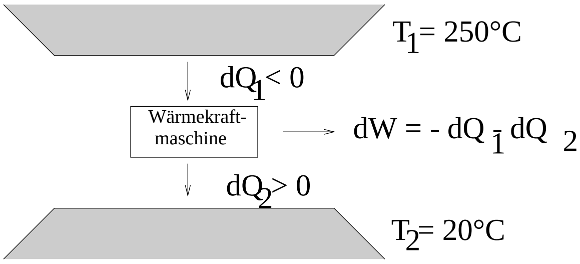

Abbildung 3: Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine

Jedes geschlossene System strebt den Zustand der größten Unordnung, beziehungsweise den wahrscheinlichsten Zustand an.

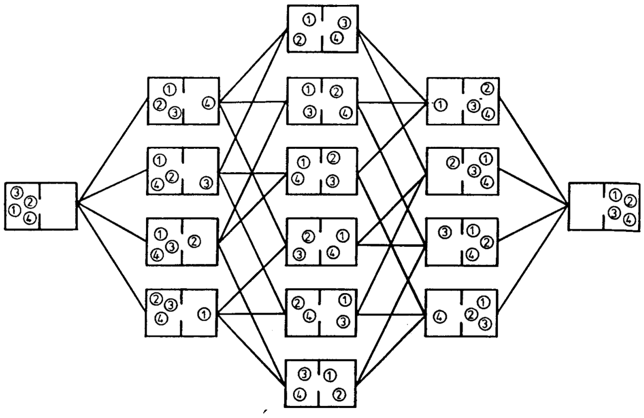

Abbildung 4: Wahrscheinlichkeit von Verteilungen [GKV89].

Wie wir in Abbildung 4 sehen, sind wesentlich mehr Möglichkeiten für eine Gleichverteilung der Gasmoleküle gegeben als für die Konstellation, daß die Gasmoleküle sich nur in einer der beiden Kammern befinden. Eine quantitative Darstellung erlaubt

$$S = k \ln P$$

3 Entropie und Ordnung

Warum kann es in der Natur zur Musterbildung kommen, wenn alle Systeme den Zustand größter Unordnung anstreben ? Die Natur auf der Erde ist ein **offenes System** mit ständiger Energieaufnahme und -abgabe.

3.1 Musterbildung in offenen Systemen

Selbstorganisierende Systeme befinden sich weit entfernt vom **thermodynamischen Gleichgewicht**, sonst würden sie nach dem zweiten Hauptsatz in den Zustand größter Unordnung

übergehen. Ordnung kann z.B. in einem Milieu **ständiger Energieumsetzung** entstehen. Wie bei der Kerzenflamme kann ein sogenanntes Fließgleichgewicht entstehen.
Die Ausbildung von Bienenwabenmustern bei der Flüssigkeitserhitzung ist ein Beispiel für Musterbildung.

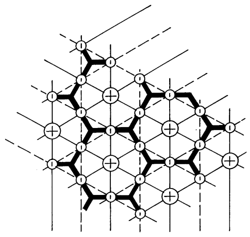

Abbildung 5: Veranschaulichung der Bienenwabenmuster[Hak86].

In der Mitte einer Wabe steigt die am Boden erwärmte Flüssigkeit auf und kühlt oben an der Oberfläche wieder ab. An den Rändern sinkt die abgekühlte Flüssigkeit wieder nach unten. Als Erklärung findet sich, daß die Struktur den effektivsten Wärmetransport erlaubt. Bienenwabenmuster enstehen auch bei erhitztem Skiwachs.

Biologische Gestaltbildung kann zum Beispiel durch die konkurrierende Wechselwirkung von Aktivator- und Inhibitorsubstanzen, die zu räumlichen Mustern führen, erzeugt werden [BS94].

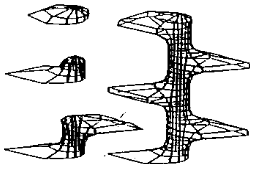

Abbildung 6: Periodische Struktur: Das Wachstum von Zweigen [BS94].

Zu Beginn existiert ein kleines Feld gleicher Attraktor–Inhibitor–Konzentration. Durch zufällige Schwankung entsteht mehr Aktivator, der zu einer erhöhten Inhibitorproduktion führt. Der Inihibitor diffundiert allerdings und kann die Aktivatorproduktion nicht zurückregeln. Durch Autokatalyse entsteht ein Aktivatormaximum. Die nun wesentlich erhöhte Inhibitorproduktion führt zur Verhinderung weiterer Aktivatormaxima in der Nähe des ersten. Der Inhibitor diffundiert wieder und nimmt mit größerer räumlicher Entfernung zum Aktivator ab, so daß weiter entfernt das Feld wieder ausgeglichen ist. Bei der nächsten Schwankung wird der gleiche Prozeß wieder eingeleitet.

3.2 Unterschiede zwischen natürlicher und industrieller Musterbildung

Ich möchte die Unterschiede zwischen natürlicher und industrieller Musterbildung an folgenden Beispielen erläutern. Beim **Baum** führen mikroskopische Umwandlungsprozesse zur makroskopischen Struktur. Als Abfallprodukte entstehen O_2 und Laub, das teilweise dem Boden wieder Rohstoffe zurückführt. Bei Rodung und Neupflanzung kann es allerdings zur Nährstoffauszehrung kommen.
Beim **Baustahl** wird Eisenerz mit Kohle verhüttet. Unter zusätzlicher Energieaufwendung wird eine Struktur von außen aufgeprägt. Da Baustahl häufig im Verbund mit Beton eingesetzt wird, ist ein Recycling nur schwer möglich.

4 Anwendung von Entropiebetrachtungen auf die Wirtschaft

Wie lassen sich die Begriffe von Entropie und Ordnung nun in die Betrachtung der Wirtschaftsprozesse einbeziehen ?

4.1 Irreversibilität ökonomischer Prozesse

Eine populäre Maxime in der Wirtschaft war

> Von nichts kommt nichts.

Da Ressourcen Lagerstätten niedriger Entropie darstellen, müßte dieser Satz unter der Berücksichtigung der Entropie lauten:

> You cannot get anything but at a far greater cost in low entropy

Auf Deutsch bedeutet dies, daß keine Produktion ohne Ressourcenverbrauch und Entropieerhöhung möglich ist.

4.2 Negativer Fluß von Entropie

Wie schon gesehen kann die Entropie in einem geschlossenen System nur steigen. Wenn wir das Wirtschaftssystem in Kontakt zur Umwelt bringen, ist es allerdings möglich, daß die Entropie lokal sinkt. Die Herstellung einer Legierung aus Rohstoffen ist ein Beispiel.

- Rohstoffe V_1 und V_2
- Produktion: völlige Vermischung

$$\Delta S = k_B(N_1 \ln \frac{V}{V_1} + N_2 \ln \frac{V}{V_2}) > 0$$

Nachdem die Legierung als Abfall der Umwelt wieder zugeführt worden ist, hat sich die Gesamtgröße der Rohstoffe nicht geändert und das Ergebnis besteht nur aus einem positiven Fluß von Entropie aus dem Wirtschaftssystem in die Umwelt

oder da die Rohstoffe das Wirtschaftssystem in die Lage versetzt haben, Entropie abzugeben, aus einem

negativen Fluß von Entropie aus der Umwelt in das Wirtschaftssystem.

4.3 Entropie als Variable in Schadensfunktionen

Es soll jetzt versucht werden, die Effekte von Schadstoffen in der Umwelt als Änderung der Entropie darzustellen.
Da unsere Umwelt ein offenes System ist, besteht die Möglichkeit, sich vom thermodynamischen Gleichgewicht, das das Gesamtsystem anstrebt, wegzubewegen, wenn auch nur für eine gewisse Zeit. Da die Entropie ein Maß der Ordnung in einem System ist, läßt sich das ökologische Gleichgewicht als ein Zustand von ausgeglichenen Flüssen an positiver und negativer Entropie beschreiben. Das Gleichgewicht wird gestört durch Emission von Schadstoffen, die z.B. durch Produktion und Konsum von Gütern, erzeugt werden. Die Entropie steigt. Wenn diesen ständigen Entropieerhöhungen nicht durch einen negativen Fluß von Entropie entgegengewirkt wird, könnte der Gleichgewichtszustand nicht erhalten werden. Der negative Fluß von Entropie ist durch den Zufluß von Gütern aus der Umwelt gesichert. Die Energie der Sonne ist ein Beispiel dafür. Die Entropie S soll ein Maß der Verschmutzung sein. Das Gesamtmaß der Verschmutzung für Schadstoff i sei dann:

$$W_i = \frac{1}{V}\frac{dS}{dt}$$

Dabei bezeichnet $\frac{dS}{dt}$ die Entropiezunahme und V die Größe des entsprechenden ökologischen Raums. Für jeden Schadstoff i läßt sich ein W_i finden. Außerdem soll es eine kritische Obergrenze W_{ci} geben, bei deren Überschreitung $W_i > W_{ci}$ die Gesellschaft nicht mehr überleben kann. W_{oi} bezeichnet die natürliche Reinigungsrate. Mit diesen Variablen kann eine Schadensfunktion

$$p_i = p_i(W_i; W_{ci}, W_{oi})$$

definiert werden, deren Werte klein bei $W_i \ll W_{ci}$ sind und ∞ bei $W_i \geq W_{ci}$ annehmen [FNS95]. Als Gesamtschadensfunktion bezeichnet man

$$p = \sum_{i=1}^{M} p_i(W_i; W_{ci}, W_{oi}) \tag{5}$$

Ein Beispiel ist die globale Abwärme:

$$W_{ci} = 3 \cdot 10^{14} W$$

In der folgenden Tabelle wird deutlich, bei welchem jährlichen Wachstum der globalen industriellen Produktion die kritische Grenze erreicht wird [FNS95]. Da wir bis heute noch keine vernünftige Technologie haben, um Abwärme zu beseitigen, kann man vielleicht sogar sagen:

> Abwärme kann als schwerste Form der Umweltverschmutzung angesehen werden.

jährliches Wachstum	kritische Grenze
5%	2050
3%	3000

5 Wirtschaften mit minimaler Entropieerhöhung

Da die Erde ein offenes System ist, kann die Sonnenenergie genutzt werden, um der Entropieerhöhung durch Benutzung lokaler Energiequellen zu entgehen, ebenso wie Müllvermeidung und Recycling der Entropieerhöhung entgegenwirken. Also:

> Entropieerhöhung vermeiden

5.1 Kommentar zur Entropie und Nachhaltigkeit

Heute wird die Entropie bei der Nachhaltigkeitsdiskussion unabhängig von ihrer ursprünglichen Bedeutung als „Zustandswahrscheinlichkeit“ betrachtet. Die Diskussion im offenen Ökosystem „Erde“ scheint damit sinnlos zu sein, da die Entropiezunahme in den Weltraum exportiert und durch Sonnenenergie ersetzt wird.
Die Nachhaltigkeit ist deswegen so erfolgreich, weil sie ein Gegenbild zur Entropie aufbaut und somit als Traumbild der stabilen Ordnung in der schon immer dem permanenten Wandel unterworfenen Natur die religiöse Paradiesvorstellung ablöst.

Literatur

[Bor77] W. Borst. Vom sparsamen Umgang mit Energie. *Physik in unserer Zeit*, 8(5), 1977.

[BS94] J. Bienlein and H. Spitzer. Censis, Selbstorganisation in physikalischen, biologischen und sozialen Systemen. Technical report, Arbeitsgruppe Naturwissenschaft und Internationale Sicherheit der Universität Hamburg, 1994.

[FLS87] R. P. Feynmann, R. B. Leighton, and M. Sands. *Feynmann Vorlesungen über Physik, Band 1: Hauptsächlich Mechanik, Strahlung und Wärme*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1987.

[FNS95] M. Faber, H. Niemes, and G. Stephan. *Entropy, Environment and Resources.* Springer-Verlag, Berlin, 1995.

[GKV89] Gertsen, Kneser, and Vogel. *Physik.* Springer-Verlag, Berlin, 1989.

[Hak86] H. Haken. *Erfolgsgeheimnisse der Natur.* Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1986.

[Kuh82] Kuhn. *Physik 3b: Energie und Entropie.* Westermann, Braunschweig, 1982.

[Nol93] W. Nolting. *Grundkurs: Theoretische Physik.* Verlag Zimmermann-Neufang, Ulmen, 1993.