Information und Entropie

Mohamad Habes
HFT Stuttgart

28. Januar 2007

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

„In der Informatik geht es genauso wenig um Computer wie in der Astronomie um Teleskope."
Edsger Dijkstra

Auf den ersten Blick ist die Thermodynamik mit der Informatik nicht in Verbindung zu bringen. Im Rahmen der Thermodynamik ist der Begriff Entropie ein Hauptbegriff, der durch Boltzmann in der statistischen Thermodynamik eine Form bekommen hat. Dem Begriff Entropie wurde durch Shannon* ein Zusammenhang mit der Information gegeben. Shannon, der als Vater der Informationstheorie gilt, hat in seinem Buch "*The Mathematical Theory of Communication*" zum ersten Mal eine Formel für diese neue Entropie veröffentlicht. Die Formel ähnelt auffallend der Entropie in der statistischen Thermodynamik. Dabei stellt sich die Frage, ob diese beiden Entropien äquivalent sind und ob die Thermodynamik doch eine Rolle in der Informatik spielt bzw. ob thermodynamische Konzepte -besonders die Entropie- verwendet werden können, um Computer der Zukunft zu entwickeln.

In dieser Arbeit werden die Begriffe Information und Entropie genauer erklärt und die genannten Entropien miteinander verglichen.
Im zweiten Kapitel wird eine kleine Einführung in die Thermodynamik erfolgt und deren Entropie erläutert.
Im dritten Kapitel wird eine Einführung in die Informationstheorie und die zugehörige Entropie gegeben.
Im vierten Kapitel werden die Entropien verglichen und daraus ein Ausblick auf die Forschung im Bereich Thermodynamik und Informatik abgeleitet.

---
*Ein amerikanischer Mathematiker und Elektrotechniker

2 Thermodynamische Grundlagen

2.1 Bedeutung der Thermodynamik

Der Anfang der Thermodynamik liegt im 19 Jahrhundert. Sie ist also eine relativ junge Wissenschaft, die in die klassische Physik einzuordnen ist.
Das Wort geht auf die griechischen Worte „therme", das Wärme heißt und „dynamis" das Kraft heißt zurück. Die Thermodynamik als Wissenschaft beschäftigt sich mit den Aspekten der Energien allgemein und mit den Transformationen verschiedener Energieformen untereinander, darunter auch Krafterzeugung und Kühlung.
Man unterscheidet zwischen der klassischen Thermodynamik, die sich nicht mit der inneren Struktur des Systems beschäftigt, und der statistischen Thermodynamik, die die Elementarbausteine des Systems z.B. die Moleküle eines Gases betrachtet [10].

2.2 Begriffe aus der Thermodynamik

Das System in der Thermodynamik ist die Substanz, die Gegenstand einer thermodynamischen Untersuchung ist. Der Bereich außerhalb des Systems wird Umgebung genannt.
Jedes System hat eine innere Energie (U) . Sie ist die Summe der beinhalten Energien des Systems.
Sprachlich ist das Wort Temperatur (T) schwer zu definieren. Der Wärmesinn erkennt, was warm und kalt ist, und die Temperatur an sich gilt als Größe oder Maß der Wärme.
In der Physik gibt es mehrere Skalen für die Temperatur. Die übliche Skala ist die Celsius- Skala (C) . Die thermodynamische Temperatur hat die Kelvin Skala, die bei dem absoluten Nullpunkt anfängt $T=C+273$, und der absolute Nullpunkt ist zu erreichen bei dem $-273\,°C$.
Experimentell ist es bekannt dass, die Wärme von einem System höherer Temperatur zum System niedriger Temperatur fließt, bis beide Systeme in thermischem Gleichgewicht sind.
Das führt zu der Formulierung des ersten Axioms der Thermodynamik [5],[10].

2.3 Hauptsätze der Thermodynamik

Die Hauptsätze in der Thermodynamik sind Axiome oder Erfahrungssätze. Diese Gesetze nimmt man als selbstverständlich und sie sind nicht beweisbar. Sie sind auch nicht widerlegt sondern immer wieder bestätigt durch die Experimente.

Das erste Axiom, wurde wegen seiner Entstehung 50 Jahre nach dem ersten und zweiten als nullter Hauptsatz bezeichnet. Es lautet:

*„In einem abgeschlossen System, das keine Energie mit der Umgebung tauscht
Bringt man zwei Körper mit der Temperatur T1 bzw. T2 in "thermischen" Kontakt, wird sich die Temperatur allmählich ausgleichen; nach genügend langer Zeit hat der Körper die Temperatur T3,die zwischen T1und T2 liegen wird."*

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist der Satz der Energieerhaltung, dabei wird wie folgt in einem geschlossenen System formuliert:

„Die Änderung der inneren Energie U ist gleich der Summe aus zu- oder abgeführter Wärme Q und Arbeit W "

Formal $$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \qquad (1)$$

Die globale Formulierung für den Satz lautet nach Clausius:

„Die Gesamtenergie des Universums ist konstant."

Dieser Satz liefert Folgerungen wie das Prinzip der Erhaltung der Energie:

„*Die Energie verschwindet nicht, wird aber in verschiedene Formen umgewandelt.*"

Eine weitere Folgerung ist, dass jedes System innere Energie besitzt. Sie ist dann konstant, wenn das System vollkommen abgeschlossen ist. Bei offenen Systemen folgt für die Energiebilanz, dass die Änderung der totalen Energie gleich der Summe der aufgenommenen Energie, davon abgezogen der Summe der abgegebenen Energie ist:

$$\Delta U = \Delta Q_{ein} + \Delta W_{ein} - \Delta Q_{aus} - \Delta W_{aus} \qquad (1)'$$

Dies sein an einem Beispiel näher erläutert: Beim Heizen eines Raumes mit einer elektrischen Heizung erfolgt nach dem ersten Hauptsatz eine Umwandlung der Energie von der elektrischen Form in Wärme. Die Energie, die in die Heizung gesteckt wurde, ist gleich der Energie, die als Wärme heraus kommt.
Egal wie viel Wärme man in die Heizung steckt, die Wärme wird nicht umgewandelt in Elektrizität, weil die Prozesse im normalen Leben immer –oder fast immer – irreversibel (nicht umkehrbar) sind.
Der erste Satz begrenzt nicht die Richtung des Prozesses, und er betrachtet auch nicht, wann der Prozess zustande kommt. Dafür steht das zweite Axiom der Thermodynamik mithilfe einer Eigenschaft, die *Entropie* heißt.
Der zweite Hauptsatz lautet:

„Nur ein Teil der Wärme lässt sich in Arbeit umwandeln bzw. nur am absoluten Nullpunkt lässt sich Wärme vollständig in Arbeit umwandeln."

Clausius, einer der Begründer der Thermodynamik, hat als Folgesatz von diesem Hauptsatz bewiesen, dass

bei reversible Prozessen $$\frac{\Delta Q}{T} = 0 \qquad (2)$$ Clausius-Theorem

bei irreversiblen Prozessen $$\frac{\Delta Q}{T} > 0 \qquad (3)$$ Clausius-Ungleichung.

Dabei ist (T) die Temperatur und Q die Wärme im System.
Nach diesen Formeln von Clausius, hat er realisiert, dass er eine neue thermodynamische Eigenschaft entdeckt hat und er hat ihr den Namen **Entropie** gegeben, die mit dem Symbol S bezeichnet wird.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \qquad (4)$$

Auch der zweite Hauptsatz hat eine globale Formulierung nach Clausius bekommen und lautet:

„Die Gesamtentropie des Universums nimmt stets zu.“

Dass die Formulierung zutrifft, wird klar, wenn man das Universum als gesamtes System betrachtet und dass die meisten Prozesse irreversibel sind und sogar die reversiblen Prozesse die Entropie nicht ändern.
Der Entropienullpunkt eines Stoffes ist nötig um den absoluten Wert der Entropie zuzuordnen. Dieser Punkt liegt bei $T=0\,Kelvin$ wo der Stoff in dem Punkt ein perfektes Kristall bildet. Das führt zur Formulierung des dritten Axioms.
Der dritte Hauptsatz lautet:

„Am absoluten Nullpunkt der Temperatur nimmt die Entropie eines reinen kondensierten Stoffes im Zustand eines perfekten Kristalls den Wert Null an.“

Allerdings ist der Nullpunkt nicht zu erreichen. Die Versuche, die in dem Bereich gemacht wurden, bewegten sich immer nur in der Nähe.
Alle Hauptsätze wurden nach C.P. Snow folgendermaßen zusammengefasst:

Zeroth: *"You must play the game."*
First: *"You can't win."*
Second: *"You can't break even."*
Third: *"You can't quit the game."*

[5],[10].

2.4 Der Begriff Entropie

Als Clausius im Jahr 1850 seine Versuche über die reversiblen (umkehrbaren) und irreversiblen Prozesse durchführte, kam er auf die Formel *(4)*.
Dabei wurde immer die Differenz betrachtet. Daraus abgeleitet definierte er die Größe (S), die er als Entropie bezeichnete.

$$S=\frac{Q}{T} \qquad (5)$$

Da die Wärmemenge Q nicht als Absolutwert messbar oder berechenbar ist, war die Differenz entscheidend. Man konnte nicht die Entropie selbst berechnen, aber deren Änderung.
Die thermodynamische Entropie ist eine physikalische Größe, Wie die Energie oder das Volumen ein Makroskopischen System charakterisiert. Mikroskopische Systeme besitzen keine Entropie. Man könnte keine genaue Definition dafür geben, auf der anderen Seite hat die Energie keine explizite Definition, trotzdem hat das unser Verständnis von den zugehörigen Prinzipien -wie die Umwandlung- nicht verschlechtert.
In der Statistischen Thermodynamik wird die Entropie gesehen als Größe der Unordnung oder Zufallsverteilung der Moleküle. Von daher ist es klar, dass die Entropie im Gas höher ist als im Festkörper.
Boltzmann und Max Planck haben die Relation zwischen der Entropie S und der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit W berechnet, die man bekommt, wenn man die Anzahl der möglichen Molekülenkonfigurationen (Mikrozustände) in einem gegebenen Makrozustand berechnet.
Dazu sagte Max Plank in einem Vortrag an der Universität Leiden 1908:

„Demnach ist die Entropie proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit

$$S = k \ln(W) \qquad (6)$$

und man braucht zur Berechnung der Entropie nicht mehr wie bei Clausius einen reversiblen Prozess auszuführen.“

Wobei k für die Boltzmann-Konstante steht, die den Wert $k_B = 1.380658 \times 10^{-23}\, Joule/Kelvin$ hat. Damit hat Boltzmann die Gleichung folgendermaßen angegeben:

$$\boxed{S = -k_B \sum_i p_i \ln(p_i)} \qquad (7)^*$$

pi steht für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Molekül (i) sich in einem bestimmten Mikrozustand befindet.
Man kann diese Wahrscheinlichkeit durch die Boltzmann-Verteilung berechnen

$$\boxed{p_i = \frac{e^{\frac{-E_i}{k_B T}}}{\sum_i e^{\frac{-E_i}{k_B T}}}} \qquad (8)$$

E steht für die Energie eines Moleküls in einem bestimmten Mikrozustand.
Wenn man die Formel *(7)* anschaut, sieht man dass die Einheit der Entropie $(Joule/Kelvin)$ auch in der Boltzmann-Konstante steckt, da die Wahrscheinlichkeit keine Einheit hat. [2],[5],[10].

2.5 Entropie im täglichen Leben

Hierbei werden zwei Beispiele aus dem täglichen Leben für die Entropie gebracht damit der Begriff fassbar wird.
Beispiel A:

Effektiv arbeitende Menschen leben in einer Umgebung mit geringerer Entropie als die Menschen, die weniger effektiv arbeiten. Sie haben Räume, die besser geordnet sind (geringere Entropie). Für einen Prozess wie z.B. die Suche nach einem Buch brauchen sie deutlich weniger Energie als uneffektiv arbeitende.

Beispiel B:
In der Politik ist bekannt, dass zehn Länder, die keine Einheit bilden, immer schwächer sind als ein Land, das sie als Einheit verbindet. Man könnte die antike Herrschaftsweisheit „Teile und herrsche“ thermodynamisch formulieren als „steigere die Entropie und herrsche“ [10].

Die Informationstheorie und die Entropie von Shannon werden im nächsten Kapitel erläutert.

---

* Der Beweis ist unter [1] zu finden.

3. Informationstheoretische Grundlagen

3.1 Der Begriff Information

Das Wort Information stammt aus dem 16. Jahrhundert und leitet sich vom lateinischen Verb „informare“ ab, das heißt „durch Unterweisung, bilden, unterrichten“. Später bekam das Substantiv „Information“ die Bedeutung „Nachricht, Auskunft, Belehrung, Neuigkeit“, die es bis heute behalten hat.
Die Analyse des Informationsbegriffs in der natürlichen Sprache hat ergeben, dass die Information unter verschiedenen Aspekten zu sehen ist.

- Syntaktisch
- Semantisch
- Pragmatisch

Die Aspekte werden klarer durch folgendes Beispiel:
Es gebe zwei Personen A,B, die sich miteinander unterhalten. Wenn Person A ein Wort zu B sagt, wird zuerst der erste Aspekt betrachtet. Nämlich die Wahrscheinlichkeiten mit denen die Buchstaben (Zeichen) des Wortes gesagt werden. Der zweite Aspekt hingegen berücksichtigt die Bedeutung des Wortes. Der dritte Aspekt dient der Wirkung des Wortes, ob B das Wort wahr nimmt oder nicht.
In der Informationstheorie ist nur die syntaktische Seite der Information betrachtet, der semantische und pragmatische Aspekt werden nicht betrachtet.

„This word information in communication theory relates not so much to what you do say, as to what you ***could*** *say“ -W.Weaver-* [7],[9].

3.2 Was ist Informationstheorie?

Die Informationstheorie ist die Theorie, die sich mit den mathematischen Gesetzen der Übertragung und Bearbeitung der Information beschäftigt. Genauer gesagt beschäftigt sie sich mit dem Messen der Information (Informationsgehalt), mit der Darstellung der Information (Codierung) und mit der Leistungsfähigkeiten von Kommunikationssystemen.
Der Begründer dieser Theorie war Claude E. Shannon mit seinem Artikel „*The Mathematical Theory of Communication*“.
Die Information unter der Informationstheorie hat folgende Eigenschaften:

- Information altert nicht.
- Information ist unabhängig vom Ort, hat kein Original und ist beliebig kopierbar.
- Information ist beliebig kombinierbar.

3.3 Information und Kommunikationssysteme

Ein Kommunikationssystem kann symbolisch wie in Abbildung 1 gezeigt werden.
Die Nachrichtenquelle wählt aus einer bestimmten Menge von Nachrichten eine Nachricht aus, die an den Sender übergegeben wird. Diese Nachricht kann eine bestimmte Folge aus Zeichen sein. Der Sender schickt die Nachricht an den Empfänger als Signal, das Signal wird über einen Kanal übertragen. Die Signale sind physikalische Größen, entweder analoge oder digitale Signale. Der Empfänger bekommt das Signal, übersetzt es und leitet die Nachricht schließlich an das Ziel weiter.

Auf dem Weg bekommt das Signal verschiedene Sorten von Störungen, z.B. Tonverzerrungen in der Telefonie.
Ein Beispiel dafür: Ein Raumfahrzeug kann als Nachrichtenquelle dienen. Es nimmt ein Bild vom Jupiter auf und schickt es an die Erde. In diesem Fall ist das Bild die Nachricht. Der Sonde überträgt das Bild in Signale und fungiert als Sender. Die Distanz zwischen Erde und Jupiter ist der Kanal. Störungen machen das Signal schwächer. Der Empfänger ist ein Gerät, das das Signal wieder in ein Bild übersetzen kann. Das Nachrichtenziel ist z.B. ein Astronom, der das Bild während seiner Beobachtung des Jupiters empfängt.

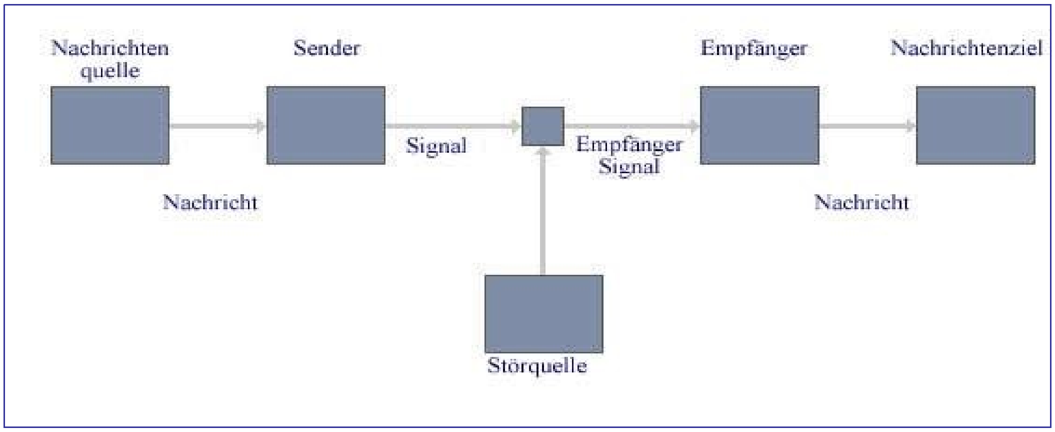

Abb.1 Kommunikationssystem [8]

3.4 Informationsgehalt

Das vom Sender gesendete Zeichen in dem Kommunikationssystem ist eines von verschiedenen möglichen Zeichen. Um den Gehalt der Information in dem Zeichen zu messen hat Shannon beobachtet, dass jedes Zeichen als eine Sequenz von verschiedenen Antworten auf (ja/nein) Fragen dargestellt werden kann. Um den Informationsgehalt messbar machen zu können hat Shannon die drei Axiome des Informationsgehalts eingeführt:

(I) *Der Informationsgehalt eines Zeichens x_i Element aus X mit der Wahrscheinlichkeit P i ist ein nicht negatives Maß* $I(p_i) \geq 0$

(II) *Die jeweiligen Informationsgehalte eines unabhängigen Zeichenpaares* (x_i, x_y) *mit der Verbundwahrscheinlichkeit* $P(x_i, x_j) = p_{i,j} = p_i . p\, j$ *addieren sich*

$$I(p_{i,j}) = I(p_i) + I(p_i)$$

(III) *Der Informationsgehalt ist eine stetige Funktion der Wahrscheinlichkeiten der Zeichen.*

Daraus folgerte Shannon $I(p)=-\log(p)$ *(10)*
als globale Formel für den Wert des Informationsgehalts. Die Basis des Logarithmus ist abhängig von der Darstellung. In der von Shannon benutzten Binärdarstellung -Ja,Nein- ist das der duale Logarithmus,Logarithmus dualis, der Logarithmus zur Basis 2. In diesem Fall bekommt der Informationsgehalt die Einheit **bit** (**b**asic indissoluble **i**nformation uni**t**)

Daraus folgt: $I(p)=-ld(p)$ *(11)*
Der Informationsgehalt ist gleich der Anzahl der binären Entscheidungen, die man benötigt um das Zeichen darzustellen.
In Abb.2 wird die Funktion der Informationsgehalt gezeigt.

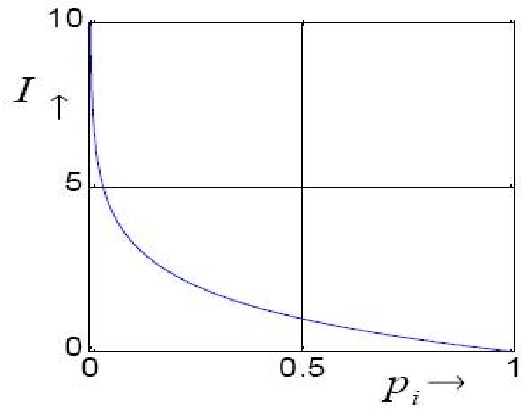

Abb.2 Informationsgehalt

Beispiel:
Angenommen sei eine Nachrichtenquelle Q mit Zeichenvorrat
$\{a, b, c, d, e, f\}=\{x_i, x_2, \ldots x_6\}$.
In der Tabelle sind zusammengefasst die Wahrscheinlichkeiten $p(i)$ und die zugehörigen Informationsgehalte $I(p_i)$.

x_i	a	b	c	d	e	f
p_i	**0,05**	0,15	**0,05**	0,4	0,2	0,15
$I(p_i)$	**4,32 *bit***	2,74 *bit*	**4,32 *bit***	1,32 *bit*	2,32 *bit*	2,74 *bit*

Aus der Tabelle ergibt sich, dass ein selteneres Zeichen einen höheren Informationsgehalt besitzt. Dies führt zu dem folgenden Resultat:
Der Informationsgehalt eines Zeichens ist proportional zu der Überraschung, denn je geringer die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Zeichens ist, desto höher ist der Überraschungswert.

3.5 Shannon-Entropie

Nachdem der Informationsgehalt definiert wurde, kann man den Erwartungswert oder den Mittelwert davon berechnen:

$$I(p_1, p_2, \ldots, p_n)=\sum_i p_i I(p_i)=-\sum_i p_i \log(p_i)$$

Diese Formel hat Shannon betrachtet. Aufgrund der formalen Übereinstimmung mit Formel *(7)*, hat er sie auch Entropie genannt und mit H bezeichnet.

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = -\sum_i p_i \log(p_i) \qquad (12)$$

mit der Basis 2 ergibt sich daraus:

$$\boxed{H = -\sum_i p_i ld(p_i)} \qquad (13)$$

Angenommen sei eine binäre Nachrichtenquelle Q = {1,0} mit den Wahrscheinlichkeiten $p_0 = p$, $p_1 = 1 - p$ daraus folgt:

$$H = -p\, ld(p) - (1-p)\, ld(1-p) \qquad (14)$$

Diese Funktion heißt Shannon-Funktion und wird in Abb.3 gezeigt.

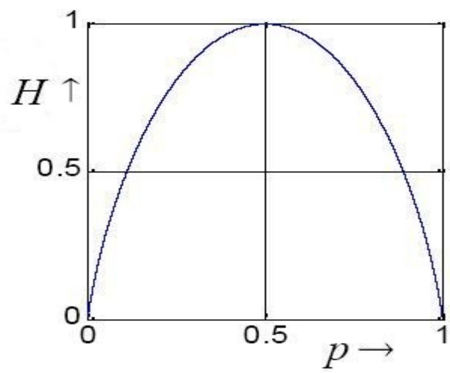

Abb.3 Shannon-Funktion

Bei einem idealen Münzenwurf ist H = 1 bit (Maximum der Shannon-Funktion), und so bekommt das bit als Einheit eine neue Definition:

„Ein bit ist genau der Informationsgehalt in einem idealen Münzenwurf."

Für den spezialen Fall, dass alle Ereignisse dieselbe Wahrscheinlichkeit haben, lässt sich die Entropie vereinfachen auf $H = ld(n)$. Diese spezielle Entropie wird Entscheidungsgehalt genannt und lässt sich auf die folgende Weise definieren:
Minimale Anzahl von ja/nein-Entscheidungen, die im Mittel notwendig sind, um Zeichen der Quellen darzustellen.
Allgemein lässt sich die Entropie definieren als die Zufallsmenge die in einer Nachrichtenquelle versteckt ist [2],[6],[7],[9].

3.6 Codierung

Im Kommunikationssystem wird der Sender die Nachricht codiert senden, er konvertiert die Information also zum Code. Der Empfänger decodiert den Code und entschlüsselt ihn. Damit konvertiert er ihn wieder zu einer Information, die für das Nachrichtenziel (s.Abb.1) „verständlich" und „nützlich" sein kann.
In der Praxis werden sehr viele Codierverfahren benutzt. Ein einfaches Beispiel ist der Morsecode.

4. Vergleich der Entropie-Begriffe

Bei der Betrachtung der zwei Entropien in den Formeln *(7)* und *(13)* fällt sofort die formale Übereinstimmung zwischen der statistischen thermodynamischen Entropie und der Entropie von Shannon ins Auge. Es stellt sich also die Frage, ob man sie gleichsetzten kann.

Der erste Unterschied zwischen den beiden liegt im Logarithmus. In *(7)* steht der natürliche Logarithmus, in (13) Logarithmus zur Basis 2.

(7) $$\boxed{S=-k_B \sum_i p_i \ln(p_i)} \qquad \boxed{H=-\sum_i p_i\, ld(p_i)}$$ *(13)*

Dabei handelt es sich jedoch um keinen großen Unterschied, denn Shannon hat die Basis nicht zwingend festgelegt. Die Basis hängt mit dem Zeichen-Darstellungssystem zusammen: Im Dualsystem gilt der Logarithmus zur Basis 2, im Dezimalsystem der Logarithmus zur Basis 10, usw.

Es ist aber auch wichtig, die Bedeutung der Wahrscheinlichkeiten in den Formeln zu betrachten. In Formel (*7*) ist p_i die Wahrscheinlichkeit, dass ein Molekül (i) sich in einem bestimmten Mikrozustand befindet, oder allgemeiner die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Energiezustände der Bausteine eines materiellen Systems. Dies lässt sich berechnen durch die Boltzmann-Verteilung nach Formel *(8)*.
Bei der Entropie von Shannon ist p_i dagegen die Eintrittswahrscheinlichkeit beliebiger Ereignisse ohne Spezifizierung des Inhaltes. Da diese Ereignisse nicht den mechanischen Grundgesetzen (Energie und Impulserhaltung) gehorchen, braucht die Entropie von Shannon nicht dem zweiten Hauptsatz zu genügen.
Daraus folgt, dass die Entropie von Shannon allgemeiner ist als die statistische thermodynamische Entropie. Folglich ist die statistische thermodynamische Entropie ein Spezialfall der Entropie von Shannon. Das heißt im mathematischen Sinne :

$$\textit{Entropie}-\textit{Begriff von Shannon} \Rightarrow \textit{statistische thermodynamische Entropie}$$

Umgekehrt gilt dies nicht. Das heißt: Die beiden Entropien sind **nicht** äquivalent.

Wenn man die p_i in Formel *(7)* im Sinne der statistischen Thermodynamik festlegt, und die Beziehung zwischen dem Logarithmus dualis und dem natürlichen Logarithmus berücksichtigt, kann man schreiben:

$$\boxed{S=k_B \ln(2) H} \qquad (15)$$

Mit dieser Formel wird klar, dass bei der Zunahme von S entsprechend der Wert von H zunimmt. Auch von dieser Formel kann man eine Definition für das bit herleiten:
„1 bit entspricht dem Informationsgehalt eines Systems, dessen Entropie $0{,}9657 \times 10^{-23}\, \textit{Joule}/\textit{Kelvin}$ *ist“*
Damit ist eine informationstheoretische Interpretation der thermodynamischen Entropie möglich:
Die statistische thermodynamische Entropie des Makrozustands eines Systems entspricht der Information, die notwendig ist, um den Mikrozustand aufzuklären.

Dazu sagt C. F. v. Weizsäcker:

„Die Entropie misst die potentielle Information des Experimentators. Sie misst, wie viel derjenige, der den Makrozustand kennt, noch wissen könnte, wenn er auch den Mikrozustand kennen lernte."

[2],[4].

5 Zusammenfassung

Diese Arbeit hat sich mit der Beziehung zwischen dem thermodynamischen und dem informationstheoretischen Begriff der Entropie beschäftigt.
In einer Einführung in die Thermodynamik wurde der Begriff Entropie verdeutlicht.
Eine Einführung in die Shannon'sche Informationstheorie hat gezeigt, dass auch hier der Begriff der Entropie eine wichtige Rolle spielt.
Ein Vergleich zwischen den beiden Entropien führte zu dem Schluss:
Die statistische thermodynamische und die informationstheoretische Entropie von Shannon sind nicht identisch und nicht äquivalent. Es wurde gezeigt, dass die statistische thermodynamische Entropie ein Spezialfall der informationstheoretischen Entropie ist.

6 Ausblick

Manche Wissenschaftler wie M.P.Frank von der Universität Florida versuchen die Konzepte aus der Thermodynamik im Zusammenhang mit der Entropie effektiver in den Prozessoren einzusetzen. In seinem Artikel „The physical limits of Computing" vom Jahr 2002 sieht Frank voraus, dass die Leistung der heutigen Computer durch thermodynamische Gesetze begrenzt ist.
Ein Forschungsgebiet in diesem Bereich heißt „reversible Computing". Die Grundidee ist, die Energie in den Prozessoren auszunutzen und die ungewollte Entropieerhöhung („Unknown Information") durch thermodynamisch reversible Methoden rückgängig zu machen. Darin sieht Frank eine Möglichkeit, die „thermodynamische Grenze" heutiger Computer hinauszuschieben.[3].

Literatur

[1]. Brand , H., *Online-Skript Thermodynamik und Statistische Physik*. Internet: http://saftsack.fs.uni-bayreuth.de/thermo/entropie.html 1996. Universität Byreuth -besucht am 28.01.2007

[2]. Ebeling, W. , Freund, J. , Schweitzer, F., *Komplexe Strukturen: Entropie und Information.*1. *Auflage 1998: Teubner Verlag.*

[3]. Frank, P.D.M.P., *Physical Limits of Computing*, in *IEEE Computing in Sience& Engineering magazine*. 2002. p. 16-26.

[4]. Hägele, P.D.P.C., *Was hat Entropie mit Information zu tun?* .Internet : http://www.uni-ulm.de/~phaegele/Vorlesung/Grundlagen_II/_information.pdf 2004.Vorlesungsskript an der Uni Ulm -besucht am 05.11.2006

[5]. Hahne, E., *Technische Thermodynamik* 3. Auflage ed. 2000: Oldenbourg.

[6]. Hofferer, M., *Vortrag 1: Einführung in die Informationstheorie*. Januar 1999.Proseminar Uni Karlsruhe -besucht am 07.11.2006

[7]. POMPE, B., *Einführung in die Informationstheorie*. Internet : http://www2.physik.uni- greifswald.de/~pompe/SCRIPTS/inf.pdf 2005. FassungStudenten der Physik an der Universität Greifswald -besucht am 07.11.2006

[8]. Shannon, C.E., *The Mathematical Theory of Communication*. 1963: University of Illinois Press

[9]. Werner, M., *Information und Codierung*. 1. Auflage . 2002: Vieweg.

[10]. Y. A. Cengel, Boles, M., *Thermodynamics: An Engineering Approach* 4. Edition 2001: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.