

Wert der Information

Hans J. Pirner

Institut für Theoretische Physik und Marsilius Kolleg der Universität Heidelberg

Unser Wissen ist einerseits durch das Unbekannte beschränkt, zum anderen aber auch durch das Unerkannte und dessen Strukturen begrenzt. Wir wissen nicht, was wir nicht wissen. Trotzdem hoffen wir, dass es einen Vorrat an möglichen Informationen gibt, den wir erschließen können. Der Historiker denkt vielleicht an Quellen, die in Archiven schlummern. Der Naturforscher grübelt über Experimente nach, die neue Zusammenhänge erhellen. Wenn die Information mit der Unbestimmtheit zusammentrifft, entwickelt sie eine eigene Dynamik, die ich Informationsdynamik¹ nenne, in Anlehnung an die Thermodynamik. Ich werde zuerst die bekannte quantitative Definition der Information erklären. Dann werde ich einen neuen Zugang vorstellen, der auf einer Analyse des Informationsprozesses beruht, in welchem das komplexe System Informationen aus der unbestimmten Umwelt erhält. Ziel der Untersuchung ist die Frage: Was ist der Wert der Information? Was bestimmt die Qualität der Information?

I. Die Information

Der Begriff Information wurde 1948 durch den Mathematiker und Ingenieur C. E. Shannon quantitativ definiert. Er hat in seiner Arbeit zur Theorie von Nachrichtenquellen Information durch die möglichen Resultate bei der Übertragung eines Signals charakterisiert. Sein Informationsbegriff geht von einer Quelle aus, die zufällig verteilte Informationen aussendet. Die Information, die in jedem Zeichen steckt, ist dann eine Funktion der Häufigkeit, mit der dieses Zeichen auftritt. Nehmen wir an, wir senden eine Zeichenkette von sechs Zeichen A B B B B A, dann kommt A zweimal und B viermal vor. Aus diesen Häufigkeiten kann man die Wahrscheinlichkeit für das Zeichen A und das Zeichen B bestimmen. Die Definition der Information beruht auf zwei Grundannahmen: (i) Ein Zeichen mit einer kleineren Wahrscheinlichkeit hat einen höheren potentiellen Informationsgehalt, (ii) die Informationen für zwei unabhängig voneinander gesendete Nachrichten addieren sich. Beide Annahmen zusammen ergeben, dass die Information proportional zum Logarithmus des Kehrwertes (!) der Wahrscheinlichkeit ist. Mit der Wahl des Logarithmus zur Basis 2, ist der so definierte Informationsinhalt das Bit.²

$$I(p) = \text{Log}_2 \left(\frac{1}{p} \right) = -\text{Log}_2 (p)$$

Der Mittelwert der Information $\langle I(p) \rangle$ ergibt sich aus der Summe über alle möglichen Informationen mit ihren zugehörigen Wahrscheinlichkeiten.

$$H = \langle I(p) \rangle = \sum p_i I(p_i) = - \sum p_i \text{Log}_2 (p_i)$$

Die fundamentale Entscheidung zwischen Ja-und Nein bildet die Grundlage der klassischen, digitalen Informationstheorie. Alle Operationen der Logik und damit auch des Rechnens können mit Hilfe der binären Einheit, dem Bit durchgeführt werden. In der *Quantenwelt* gibt es eine andere kleinste Einheit der Information, nämlich das Quantenbit oder Q-bit. Das Q-bit hat im Gegensatz zum Bit unendliche viele Einstellmöglichkeiten. Dadurch ergeben sich viele neue Anwendungen und Algorithmen, die in der digitalen Informationstheorie nicht

¹ C. E. Shannon, The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

² Insbesondere gilt für den Logarithmus zur Basis 2: $\text{Log}_2 (2) = 1$, d.h. $\text{Log}_2 \left(\frac{1}{2} \right) = -1$.

realisierbar sind. Die Shannonsche Information wird in der Quanteninformation durch die von Neumannsche Entropie verallgemeinert, die die Dichtematrix enthält:

$$S = -\text{Tr } \rho \text{Log}(\rho)$$

II. Die unbestimmte Umgebung

Der Informationsempfänger befindet sich in einer Umgebung, über die er nur unbestimmte Aussagen machen kann. Ich möchte zuerst diese Unbestimmtheit quantifizieren. Informatiker verstehen den kontinuierlichen Übergang eines Begriffs von einer Bedeutung in eine andere als „Fuzzyness“. 1965 hat der Systemtheoretiker L.A. Zadeh³ dafür das Konzept der „unscharfen Menge“ („Fuzzy Set“) eingeführt. Elemente gehören unscharfen Mengen nur zu einem gewissen Grad an.

Eine unbestimmte Aussage wie „dieses Zimmer ist warm“ definiert nicht die Temperatur des Zimmers, reicht aber trotzdem oft aus, den Zustand des Zimmers für einen Bewohner zu charakterisieren. Um die unscharfe Bedeutung des Wortes „warm“ genauer zu beschreiben, ist es hilfreich, sich eine Menge von warmen Zimmern vorzustellen und dann das zur Diskussion stehende Zimmer mit diesen Zimmern zu vergleichen, um das Zutreffen oder Nichtzutreffen der Aussage festzustellen. Grundlage dafür ist ein Temperaturbereich T, auf dem wir eine Zugehörigkeitsfunktion $m(t)$ mit Werten zwischen Null und Eins definieren. Der Begriff Zugehörigkeitsfunktion ist die Standardübersetzung des englischen Begriffs „membership function“. Ich werde $m(t)$ auch als Meinungsfunktion bezeichnen, da dieser Term besser klar macht, dass es um eine subjektive Zuordnung geht und nicht um eine wirkliche Zugehörigkeit. Damit wird auch das Problem der mehrwertigen Logik von Beginn an relativiert. Meinungen können widersprüchlich sein und müssen nicht immer logisch begründbar sein. Der Wert eins der Meinungsfunktion, d.h. $m(t)=1$, entspricht der Meinung, dass die Aussage voll zutrefte und $m(t)=0$ entspricht der Meinung, dass die Aussage vollkommen falsch sei. Die Meinungsfunktion für die Aussage, dass nicht A zutrefte, ist so definiert: $m(\neg A) = 1 - m(A)$.

Ziel der Mathematisierung ist es, die Unbestimmtheit des Urteils von Experten zu quantifizieren. Man beachte, dass diese Unbestimmtheit verschieden von der Unsicherheit ist, welche durch variierende Messungen der Temperatur zustande kommt. Die Meinungsfunktion variiert zwischen null und eins, dies macht sie einer Wahrscheinlichkeit ähnlich. Sie ist aber nicht normiert und die aus ihr resultierende Unbestimmtheit unterscheidet sich von der aus der Wahrscheinlichkeit gebildeten Entropie oder Information, wie wir sehen werden. Aus der Informationstheorie⁴ ist dann ein Maß für die Unbestimmtheit $U(A)$ definierbar, welches die Eigenschaft erfüllt, dass $U(\neg A) = U(A)$.

$$U(A) = - \int dt \{m(t) \text{Log}[2, m(t)] + (1 - m(t)) \text{Log}[2, (1 - m(t))]\}.$$

Hier ist wieder der Logarithmus zur Basis 2 zu nehmen. Man kann diese Definition auch auf die Unbestimmtheit in mehreren Dimensionen oder in einem Netzwerk verallgemeinern. Nehmen wir an, wir haben ein einfaches Netzwerk, welches aus 5 Knoten besteht. Die Knoten 1-4 bilden ein Quadrat, an dessen 4. Ecke der 5. Knoten hängt. Die Verbindungsmatrix hat die Größe 5 mal 5 und ihre Elemente sind Nullen, wenn keine Verbindung besteht, und g, wenn

³ L. A. Zadeh, Fuzzy Sets, Information and Control 8, 338-353 (1965)

⁴ A. DeLuca and S. Termini, A definition of a non probabilistic entropy in the setting of fuzzy set theory, Information and Control 20, 301-312, 1972. Siehe auch: H. Bandemer and W. Näther, Fuzzy Data Analysis, (Dordrecht), p.46 (1992)

eine Verbindung mit dem Gewicht g , $0 < g < 1$, realisiert ist. Wenn man sich fragt, welche Unbestimmtheit diesem Graphen zuzuordnen ist, kann man die Definition der Unbestimmtheit auf die Verbindungsmatrix g verallgemeinern⁵.

$$U(\text{Graph}) = -\text{Spur}\{g \text{Log}[2, g] + (E - g)\text{Log}[2, (E - g)]\}$$

Beim Netzwerk wird das Integral durch die Spurbildung ersetzt und die Zugehörigkeitsfunktion durch die unbestimmte Verbindungsmatrix g .

Wegen der Unbestimmtheit der Umgebung kommt ein Bedürfnis des „Systems“ auf, genaueres über die Umgebung zu wissen, ein Informationsbedürfnis. Wir werden uns als nächstes das System anschauen und versuchen es durch seine Komplexität zu charakterisieren.

III. Das komplexe System

Für die Informationsdynamik sind Komplexität und Unbestimmtheit von zentraler Bedeutung. Wenn wir ein quantitatives Verständnis dieser beiden Begriffe besitzen, können wir den Informationsgewinn berechnen. Ziel dieses Kapitels ist es, den allgemeinen Begriff der Komplexität zu vertiefen. Was heißt Komplexität? „Weder die philosophische, noch die systemtheoretische Diskussion haben bisher eine ausreichende Antwort auf diese Frage geliefert. Ältere Begriffsumschreibungen, die komplex als zusammengesetzt erläutern, reichen nicht aus.“⁶ Rein algorithmisch hat A. N. Kolmogorow die Komplexität⁷ einer Zeichenkette durch die Länge des kürzesten Programms definiert, das diese Zeichenkette erzeugt. Die Zeichenkette 01 01 01 01 01 ist einfacher als die Zeichenkette 01 00 10 11 01. Für die erste Folge von Zahlen gibt es ein kurzes Programm, welches aus zwei Zeilen besteht. Die erste Zeile enthält den Baustein 01 und die zweite Zeile die Anweisung, fünfmal diesen Baustein 01 zu wiederholen. Deswegen ist die erste Zeichenkette nicht komplex. Ein Programm für die zweite Zeichenkette muss die einzelnen Nullen und Einsen nacheinander aufzählen. Dadurch wird das Programm ebenso lang wie die Zeichenkette, d.h. die Komplexität der Kette ist maximal. Dieser Begriff der Komplexität misst mehr die intrinsische Zufälligkeit der Kette als ihren Organisationsgrad.

Um tiefer in den Begriff der Komplexität einzudringen, brauchen wir den Begriff des „komplexen“ Systems. Ein System bezeichnet im Allgemeinen eine Organisation von Einheiten zu einem Größeren, welches dadurch neue Fähigkeiten erwirbt. Die zugehörige Systemtheorie hat sich seit den 40iger Jahren des letzten Jahrhunderts aus einer Mischung von Biologie, Mathematik und Informatik entwickelt. Ihr holistischer Ansatz setzt diese Theorie von dem traditionellen reduktionistischen Ansatz ab, die Natur zu verstehen. Während die kartesisch-reduktionistische Methode in der physikalischen Forschung historisch erfolgreich war, ist mit der Entwicklung neuer Materialien und der Untersuchung von biologischen Systemen die Bedeutung kollektiver Prozesse gewachsen.

Als System wird meistens ein offenes System betrachtet, welches in eine Umwelt eingebettet ist, die es beeinflusst. Beispiel dafür ist das Ökosystem eines Teichs⁸. Der Teich hat zwar eine klare geometrische Grenze zur Umgebung, ist aber in stetigem Austausch mit ihr. Er ist komplex, indem er die verschiedensten Lebewesen beherbergt, deren Leben aber durch die Umwelt, d.h. die Sonneneinstrahlung, den Sauerstoffaustausch und eventuelle Zuflüsse

⁵ E definiert eine Matrix, die nur Einsen enthält; und Spur definiert die Summe der Diagonalelemente der aus der Formel resultierenden Matrix.

⁶ N. Luhmann, Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie, Frankfurt a. M, 1971, S.295

⁷ Ming-Li and P. Vitanyi, An Introduction to Kolmogorov Complexity and its Applications, Springer Verlag, Heidelberg-New York, (1993)

⁸ E. P. Odum, Ecology, London, 1963 p. 29

bestimmt wird. Formal kann man sagen, dass das „bestimmte“ System aus der „unbestimmten“ Umwelt „Informationen“ bezieht. Die Komplexität des Systems bestimmt den Zustand des Systems. Ein komplexes System besteht aus aktiven Elementen („agents“) und Verbindungen („relations“). Die Organisation der Verknüpfungen ist vielfältig verwoben, verschlungen und verflochten. Deshalb werden Systeme oft durch Netzwerke beschrieben, bei denen die Agenten durch Knoten und ihre Wechselwirkungen durch Verbindungen dargestellt werden. Es wird vermutet, dass die Komplexität mit der Wiederholung von Motiven ähnlicher Gestalt im Netzwerk anwächst. Die Analyse der Eigenwerte der Verbindungsmatrix⁹ kann verschiedene Strukturtypen klassifizieren. Bei Zufallsmatrizen sind die Eigenwerte in einem Halbkreis um die Null verteilt (Wigner Verteilung). Skalenfreie und hierarchische Modelle haben eine stark erhöhte Verteilung bei kleinen Eigenwerten. Dies ist z.B. bei der Eigenwertverteilung der Verbindungsmatrix eines Proteins der Fall.

Selbst wenn es auf einer mikroskopischen Zeitskala keine Nichtlinearitäten gäbe, kann das System über Schleifen auf sich selber zurückwirken und damit nichtlineare Effekte auf einer größeren Zeitskala produzieren. Da wir bei biologischen Systemen nicht auf eine beliebig kleine Skala zurückgehen können, müssen wir diese Effekte von Anfang an zulassen. Die Stärke der Verbindungen variiert und Einwirkungen entlang der Verbindungen können in beide Richtungen erfolgen. Die Trennung der Agenten von ihren Relationen ist nicht allgemein einsichtig, sie erfordert eine Klarstellung.

In der Mikrophysik zum Beispiel, bei den Elementarteilchen unterscheiden wir Materieteilchen, d.h. Quarks und Leptonen, und Kraftteilchen, d.h. Gluonen, Photonen und Eichbosonen, welche die starken, elektromagnetischen und schwachen Kräfte zwischen den Materieteilchen vermitteln. Die netto Zahl der Materieteilchen, d.h. die Zahl der Teilchen minus die Zahl der Antiteilchen ist durch Erhaltungssätze für die Gesamtladung und die Baryonenzahl (ein Drittel der Anzahl der Quarks) eingeschränkt. Bosonische Kraftteilchen haben keine solche Einschränkung. Im Standardmodell ohne Supersymmetrie ist deshalb eine Trennung zwischen Agenten (Materieteilchen) und Verbindungen (Kräften) durchführbar.

Verschiedene Fragen stellen sich: Sollen Verbindungen grundsätzlich einfach oder selbst wechselwirkend sein? Die Gluonen z.B., welche die Quarks in den Nukleonen zusammenhalten, interagieren mit sich selbst. Web-Verbindungen können nur über Knoten im Netz miteinander kommunizieren. Sollen Verbindungen in Raum und Zeit oder in einem Raum der Funktionen verlaufen? Physiker bevorzugen das erste Modell, Biologen haben eine Tendenz zum zweiten. In neurophysiologischen Modellen stellen die Neuronen die Agenten, und die synaptischen Kopplungen die Verbindungen dar. Das neuronale Netz abstrahiert von der räumlichen Anordnung und modelliert die wesentlichen Verbindungen.

Wie ist es möglich die Umgebung vom System zu trennen? In die Umgebung möchte ich alle unbestimmten externen Einwirkungen auf das System verlegen. Die Grenze zur Umwelt ist deswegen variabel. Teile der Umwelt, die man verstanden hat, kann man zum System hinzunehmen. Die Umwelt verändert das System, da dieses auf externe Einflüsse reagiert, dadurch scheint es, dass interne Wechselwirkungsparameter auch stochastischen, d.h. zufälligen Charakter bekommen. Trotzdem ist es strukturell wichtig, System und Umwelt zu trennen. Die Differenzierung der Bestimmtheit des Systems von der Unbestimmtheit der Außenwelt ist auch in der Systemtheorie von Luhmann¹⁰ ein wichtiges Merkmal, welches in die Modellierung komplexer Systeme als Regel eingehen sollte. „Die Theorie beginnt mit einer Differenz, mit der Differenz von System und Umwelt, soweit sie Systemtheorie sein will; wenn sie etwas anderes sein will, muss sie eine andere Differenz zugrunde legen. Sie beginnt nicht mit einer Einheit, mit einer Kosmologie, mit einem Weltbegriff, mit einem Seinsbegriff oder dergleichen, sondern sie beginnt mit der Differenz.“

⁹ M. A. M. de Aguiar and Y. Bar-Am, Phys. Rev. E 71, 016106 (2005)

¹⁰ N. Luhmann, Einführung in die Systemtheorie, D. Baecker Hrsg. (Vorlesungen 1991/92), Heidelberg, 2009, S. 67 und ff.

4. Der Wert der Information (WIN)

Für die Shannonschen Information ist die Quelle Ursprung zufällig angeordneter Zeichen, die mit anderen Quellen ebenfalls zufällig angeordneter Zeichen verglichen werden kann. Diese mathematisch erfassbare Information wird als syntaktische Information bezeichnet. Wenn wir von der Bedeutung der Information sprechen, meinen wir semantische Information. Was bedeutet Bedeutung? Putnam unterscheidet in dem Aufsatz über *The Meaning of 'Meaning'*¹¹ den „extensionalen“ und „intensionalen“ Aspekt der Bedeutung. Einmal umfasst das Wort „Hase“ alle Hasen in einer wohldefinierten Menge von Hasen mit all den Problemfällen, die wir bei der unscharfen Menge diskutiert haben. Hier ist an den Umfang („Extension“) des Begriffs zu denken. Zum anderen aber hat das Wort „Hase“ auch noch einen Bedeutungsinhalt („Intension“). Dieser Inhalt schließt die übertragene Bedeutung von „Angsthase“ ein, also von jemand, der sich leicht fürchtet. Dieser zweite Aspekt hängt auch mit der Person des Sprechers zusammen, er meint etwas, was über die Menge der Hasen hinausgeht. Der erste Aspekt ist eng verbunden mit dem Begriff der Wahrheit, ein Objekt gehört entweder zu einer Menge oder nicht. Der zweite Aspekt ist ein Teil des Sprachgebrauchs einer Person und eines Teils der Gesellschaft, der diese Sprache spricht. Bei Fachbegriffen kann diese Gesellschaft auch eine Gruppe von Experten sein, die diesen Jargon ritualisiert und implementiert hat. Der dem Fach Fremde muss sich auf diesen Gebrauch des Begriffs verlassen. Der soziale Kontext ist also bei der Diskussion der Bedeutung von großer Wichtigkeit. Es gibt eine neue Bezugsebene, auf die der Begriff hindeutet.

Aus der Sicht des Informationsempfängers ist klar, dass er Information gewonnen hat, wenn er durch sie etwas weiß, was er vorher nicht wusste, also wenn sein Wissensstand zugenommen hat. Die mathematische Theorie der Information macht darüber keine Aussagen. Ich werde diesen Prozess mit der Systemtheorie analysieren. Die vom Empfänger definierte Unbestimmtheit und Komplexität kann diesen Prozess kennzeichnen.

Die Unbestimmtheit wird abnehmen, wenn neue Information richtig übertragen wird. Damit die Information zu Wissen wird, muss sie organisiert, verarbeitet und mit anderem Wissen vernetzt werden, d.h. die Organisation, die Verknüpfung oder die Komplexität des Wissens beim Empfänger wächst. Das biblische Gleichnis vom Wort, das auf „dünnen felsigen Boden oder auf gute Erde fallen kann“¹² beschreibt diese Situation treffend. Wenn jemand naturwissenschaftlich ausgebildet ist, fällt es ihm leichter, Formeln und mathematische Konzepte zu verarbeiten. Sie können in sein vorhandenes Wissen gut integriert werden, weil seine Kenntnisse viele Anknüpfungspunkte bieten.

Durch Information kommuniziert das Wissenssystem mit der unbestimmten Umwelt, in die es eingebettet ist. Am Anfang hat der Wissensstand des Empfängers eine gewisse Komplexität, und die noch unbearbeiteten Elemente der Information die es aufnehmen will, eine gegebene Unbestimmtheit. Wenn der Empfänger dann die Information verarbeitet, verändert sich die Komplexität seines Wissensstandes und die Unbestimmtheit der Umgebung nimmt ab. Meine Hypothese ist nun, dass das relative Verhältnis der Änderungen von Komplexität und Unbestimmtheit die Information bewertet; d.h. wenn eine kleine „Menge“ von Information eine große Wirkung hat, dann ist diese Information sehr wertvoll. Sie passt sozusagen sehr gut in die begriffliche Welt des Empfängers. Sie muss dazu nicht mit seinen bisherigen Anschauungen konform sein, d.h. sich zu bestehendem Wissen addieren, sondern sie muss mit diesem Wissen neue Verbindungen eingehen.

¹¹ H. Putnam *The meaning of meaning*, in *Mind Language and Reality*, (Philosophical Papers), p. 215, Cambridge University Press 1975

¹² Gleichnis im Neuen Testament, Mk 4

Rein schematisch versuche ich diesen Prozess so darzustellen. Ein Kreis symbolisiert das Wissenssystem, mit den Wissensinhalten die miteinander verbunden sind. Das System ist klar abgegrenzt von der unbestimmten Umgebung, die Elemente verschiedener Formen und Inhalte enthält. Im Akt der Information wird ein unbestimmtes Element in das System hineingebracht. Dabei gewinnt die ursprüngliche Nachricht an Bedeutung, indem sie sich mit den bestehenden Wissens-elementen vernetzt. Die Komplexität des Systems ändert sich. Die relative Änderung der Komplexität des Systems bezüglich der eingebrachten Änderung der Unbestimmtheit bestimmt den Wert der Information (WIN). Vermindert sich die Unbestimmtheit der Umgebung wenig, die Komplexität des Systems aber wächst stark, dann ist die Information ganz wichtig für die Entwicklung des Systems.

Von Fall zu Fall ist zu prüfen, wie groß die spezifische Änderung der Komplexität ist, bei einer Änderung der Unbestimmtheit des Systems. Das postulierte Gesetz für den Wert der Information (WIN) hat folgende Form:

$$\text{WIN} = \Delta \text{Komplexität} / \Delta \text{Log}[\text{Unbestimmtheit}]$$

Der Logarithmus ist eine monotone Funktion, die berücksichtigt, dass die Unordnung der unbestimmten Umgebung wie in der Thermodynamik logarithmisch anwächst. Ist die Information wertvoll, so „vergrößert“ sich das in das System eingebrachte Element, weil es sich mit vielen Komponenten des Systems vernetzt.

Ohne Zweifel wird die Informationswolke, die über unseren Köpfen im Aufbau begriffen ist, die Menge nutzloser Information erhöhen. Nach dem WIN- Kriterium kann sich im Prinzip jeder Nutzer des Internets ein Profil erstellen, welches aus den zugänglichen Informationen diejenigen herausfiltert, die einen wirklichen Gewinn für ihn darstellen. Es ist ärgerlich, dass die großen Dienstleister, wie Google, nach ihren Gesichtspunkten Profile von uns erstellen und wir selbst nicht die Software besitzen, um mit Hilfe einer Wertung die Flut von Informationen zu verwalten. Nach E. Parisers Untersuchung¹³ „The Filter Bubble“ schlägt die Suchmaschine Google bevorzugt solche Resultate vor, die zum Google Profil des Suchenden passen. Auf diese Art werden Urteile verstärkt und nicht Kenntnisse durch neue Informationen überprüft und strukturiert. Wir brauchen dringend eine bessere Methode, Informationen zu bewerten.

Wie wir gesehen haben, ist die Shannonsche Information eng mit der Entropie verwandt. Die Thermodynamik arbeitet mit der Entropie, um die Energie zu bewerten. Das Projekt der Informationsdynamik ist der Thermodynamik nachgebildet und versucht Information zu bewerten. Wir haben heute eine Situation ähnlich zur Thermodynamik im 19. Jahrhundert. Damals mussten die neugebauten Dampfmaschinen nach ihrem Wirkungsgrad beurteilt werden, den Sadi Carnot (1796-1832) aus der idealisierten Theorie von idealen Kreisprozessen herleitete. In vereinfachter Weise sagt die Entropie (S) einer Energiemenge (U) bei der Temperatur (T), wie wertvoll die Energie (U) ist, d.h. wie viel freie Energie (F=U-TS) in der vorhandenen Energiemenge verfügbar ist, um Arbeit zu leisten. Je höher der Entropieinhalt (S) in einer Energiemenge (U) ist, desto weniger Arbeit kann damit geleistet werden. Wenn der Reaktor das Kühlwasser in den Fluss leitet, dann enthält dieser Fluss immer noch viel Energie, diese kann aber nicht benutzt werden, um anspruchsvolle industrielle Anlagen zu betreiben.

Wenn Information mit der Unbestimmtheit verrechnet wird, kann der Betrag wertvoller Information (WIN) erhalten werden. Dies würde einen ähnlichen Fortschritt für die Informationstechnologie bedeuten, wie der Begriff der Entropie für die Energiewirtschaft. Ich habe versucht, den Prozess darzustellen, wie ein System Information aus der Umgebung erhält. Daraus habe ich einen Wert der Information entwickelt, der auf der Änderung der

¹³ E. Pariser, The Filter Bubble- What the Internet Hides from You, New York, 2011

Komplexität des Systems und der Unbestimmtheit der Umgebung beruht. Eine große Veränderung der Komplexität des Systems bei einer kleinen Änderung der Unbestimmtheit der Umgebung ergibt einen großen Wert der Information.