

Die Zeitrichtung

Etwa fünf verschiedene Zeitpfeile sind unterscheidbar. Da sie aber nicht konsequent zu trennen sind, werden sie im Folgenden mehr oder weniger gemeinsam behandelt:

1. Der *thermodynamische* Zeitpfeil, bei dem die Unordnung | die Entropie zunimmt.
2. Der *kosmologische* Zeitpfeil, mit dem sich das Universum ausdehnt.
3. Das *Werden* in der Natur, dem gemäß sich in der Zeit neue Strukturen | Organismen ausbilden.
4. Der *psychologische* Zeitpfeil, nach dem die Zeit unmittelbar für unser Gefühl fortschreitet und durch den wir uns an die Vergangenheit, aber nicht an die Zukunft erinnern. Bei der Zeitumkehr würde für uns vieles Handeln | Erleben den Sinn verlieren.
5. Auch das bewusste *menschliche Ordnen* | Anordnen von Objekten erfolgt in der Zeit. Es wird vor allem durch Zufallserscheinungen (quasi thermodynamisch) zerstört.

Viele Prozesse der Natur laufen in einer bestimmten Richtung ab. Aus unserer Erfahrung wissen wir, dass sich z.B. ein zerbrochenes Gefäß nicht wieder von selbst zum ursprünglichen, heilen zusammenfügt. Ein Stein, der einen Berg herunterrollt, kommt nicht wieder von selbst hinauf. Ein heißes Getränk wird zwar immer von allein kalt, kann aber ohne definierte Energiezufuhr nicht wieder wärmer als seine Umgebung werden. Damit ein heruntergefallener Stein wieder auf seine ursprüngliche Höhe hinauf gelangt, muss zweierlei erhalten bleiben: Es muss die entsprechende Energie bereitstehen und sie muss auch noch koordiniert (per Information!) in die richtige Richtung wirken. Diese Beispiele lassen sich vielfältig vermehren. Es gibt aber auch zahlreiche Prozesse, deren Zeitablauf leicht umkehrbar ist. Sie heißen reversibel. Eine Tür lässt sich beliebig oft öffnen und schließen. Viele Motoren können rechts und links herum betrieben werden. Zeitsymmetrie zeigt auch ein Pendel sowohl durch sein fortlaufendes Auf- und Abschwingen als auch durch die ständige Wandlung zwischen statischer und dynamischer (potentieller und kinetischer) Energie. Eine einfache, subjektive Entscheidung darüber, ob ein Prozess reversibel ist, besteht darin, ihn zu filmen. Wenn der Film anschließend rückwärts abgespielt wird und dabei unseren Kausalvorstellungen widerspricht, dann war der Prozess irreversibel.

Diesen Erfahrungen widersprechen nun (leider!?) allen Ergebnissen der mathematischen Physik. In allen entsprechenden Formeln, sowohl der *Newtonschen* Mechanik als auch der Relativitätstheorie und der Quantenphysik, führt eine Zeitumkehr ($-t$ statt t) wieder zu gültigen, d.h. möglichen Prozessen. Eine wichtige Variante zur Lösung dieses Widerspruchs versuchte erstmalig **Boltzmann** in der statistischen Thermodynamik (Abschnitt 1.6.4; S. 35ff.). Der Grad der Irreversibilität folgt dann aus der Entropie $S = k \cdot \ln(W)$ und damit aus dem Unterschied der Wahrscheinlichkeit W des aktuellen und künftigen Zustandes. In „abgeschlossenen“ Systemen, d.h. ohne äußere Energiezufuhr, kann die Wahrscheinlichkeit und damit die Entropie bzw. Unordnung nur zunehmen. Das ist heute schon fast anschaulich verständlich, wurde damals aber intensiv bekämpft (s.S. 36). So wurden mehrere „Gegenbeweise“ versucht. Dazu gehören u.a. die Gedankenexperimente des *Maxwellschen* Sortierdämons, des *Gibbs'schen* Umgangs mit Tinte und der *Loschmidtschen* Impulskehr (alle drei s.S. 87). Das Streben zum Gleichgewicht (maximale Entropie) leitete 1872 **Boltzmann** mittels der Stöße der Atome her. Folglich muss der Zeitpfeil in die Richtung der Gleichverteilung zeigen. Im großen Rahmen müsste daher der Wärmetod des Kosmos folgen. Bei ihm gibt es ja keine Temperaturunterschiede mehr. In einem solchen Zustand dürfte es folglich auch keine physikalische Zeit mehr geben. Befindet sich ein System im Gleichgewichtszustand, so hat es den Anfangszustand vollständig vergessen. Meist handelt es sich dabei aber um ein dynamisches, statistisches Gleichgewicht. Bei ihm gibt es laufend Schwankungen um diese Gleichgewichtslage. Genauer kann dies mit dem Gedankenexperiment, welches Paul und Tatiana *Ehrenfest* 1907 schufen, untersucht werden. Es kann als Spiel behandelt werden und verlangt dann:

- zwei Urnen, n nummerierte Steine und einen Zufallsgenerator für die n Zahlen und die Regel¹:
- Wird die Zahl x gewürfelt, so hat der Stein (Floh) der Nummer x die Urne (den Hund) zu wechseln.

Bei diesem Spiel lassen sich zwei sehr unterschiedliche Ergebnisse beobachten:

1. Im hinreichend langen zeitlichen Mittel befinden sich in jeder Urne die Hälfte der Steine. Bei einer großen Versuchszahl ist die Abweichung sehr klein, bei der *Loschmidtschen* Zahl z.B. $\approx 10^{-20}$.

¹ In einer Vulgärversion wurden die Urnen durch Hunde und die Steine durch Flöhe ersetzt. Daher rührt der Name „Hund-Flöhe-Modell“.

2. Zu ausgewählten, aber immer wiederkehrenden Zeitausschnitten treten sehr große Abweichungen von der Gleichverteilung auf.

Diese Zusammenhänge sind deutlich aus **Bild 18** (umseitig) zu entnehmen. Für 250 Würfe gilt die obere Kurve mit dem rechts stehenden Histogramm, welches die Häufigkeit der „Flöhe“ auf einem „Hund“ darstellt. Für 2250 Würfe gilt der mittlere Bildteil. Hier zeigt sich im Histogramm bereits die Betonung der zu erwartenden Gleichverteilung in beiden Urnen. Im Zeitverlauf sind dennoch zuweilen deutliche Abweichungen zu erkennen. Wird die Anzahl der Würfe weiter auf 7000 erhöht, so wird im Histogramm der Erwartungswert noch besser angenommen. Im Zeitverlauf treten trotzdem weitere „Ausreißer“, diesmal besonders zu den kleineren Anzahlen, auf. Diese immer wieder auftretenden zeitweiligen Ausreißer führen zu der Annahme, dass die Erde und damit die Menschheit in so einer Raum-Zeit-Oase lebt. Der Zeitpfeil würde dann für eine gewisse Zeit auch die Abnahme

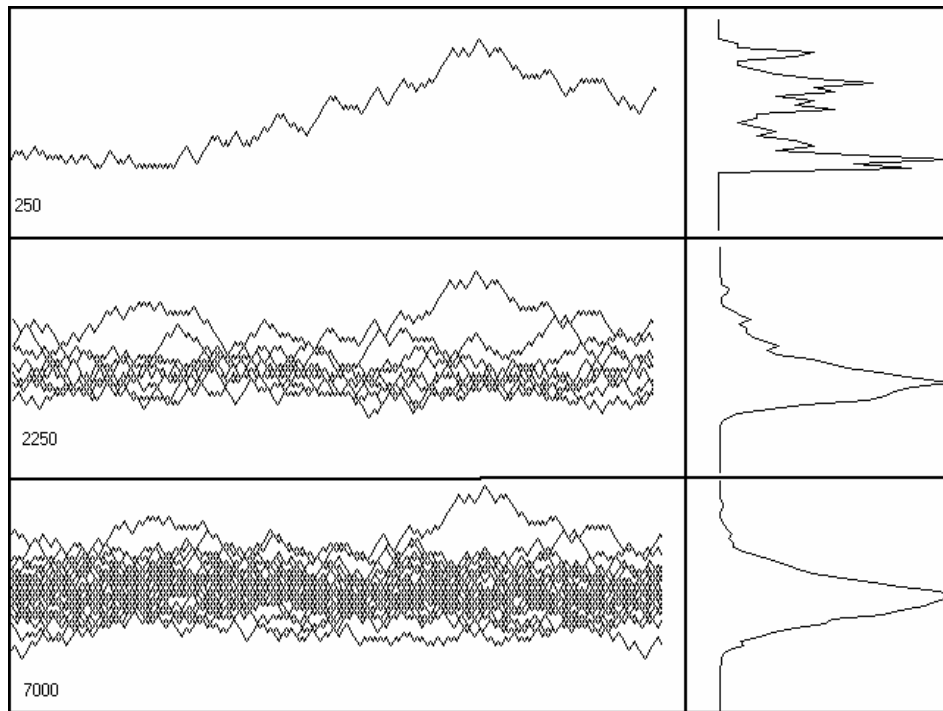


Bild 1 Zeitverläufe (links) und Histogramme (rechts) beim Hund-Flöhe-Modell von *Ehrenfest*

der Entropie im Sinne einer „Höherentwicklung“ zulassen.

Die klassische Physik und die Thermodynamik liefern also zwei sehr unterschiedliche Beschreibungen der Natur. Dazu erhebt sich die Frage, ob es – wie bei Welle und Korpuskel – nur zwei Seiten einer Sache sind und wie dann zwischen beiden zu vermitteln ist. Ein Problem besteht darin, dass der Wahrscheinlichkeitsbegriff der klassischen Dynamik völlig fremd ist. Hierzu zeigte schon Henri *Poincaré* im Jahre 1893, dass in der klassischen Mechanik keine Funktion existiert, die – wie die Entropie – immer positiv ist und mit der Zeit monoton zunimmt.

Zum physikalischen Zeitpfeil gibt es recht unterschiedliche und nur z.T. ergänzende Aussagen. So geht M. *Gell-Mann* [GEL] davon aus, dass vor dem Urknall Zeitsingularität bestand. Mit dem Urknall entstand dann mehr oder weniger zufällig der Zeitpfeil, der dann vom Universum an die Galaxien, an die Sterne, an die Planeten usw. weitergegeben wird. Albert *Einstein* hielt die Bemühungen bezüglich einer Zeitrichtung, eines „Pfeils der Zeit“ für fruchtlos; von ihm stammt der Ausspruch:

„Der Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ist für uns Wissenschaftler eine Illusion, wenn auch eine hartnäckige“.

Subjektive Vergangenheit

Ein besonderes subjektives Phänomen, ein Zeitparadox, betrifft die **Vergangenheit**. Zunächst läuft die Zeit im Rückblick – anders als in der Physik – auch vorwärts, also genauso gerichtet wie sie erlebt wurde, ab. Deutliche Unterschiede treten jedoch in den empfundenen Längen im aktuellen | ablaufenden Erleben und im Rückblick auf. Dabei sind weiter zu unterscheiden erstens abwechslungsreiche, kurzweilige | angenehme Ereignisse und zweitens Langeweile | eintönige Arbeit. Im Erleben scheint bei Langeweile die Zeit einfach nicht zu vergehen. Im Rückblick ist der zugehörige Zeitraum dagegen fast auf Nichts zusammengeschrumpft. Vom kurzweiligen Geschehen ist dagegen rückwirkend meist viel vorhanden. Thomas **Mann** (1875 - 1955) macht das in seinem „Zauberberg“ recht deutlich. Dort kommt Hans Castorp nach Davos, um seinen kranken Vetter zu besuchen. Ein Schnupfen führt zum Fiebermessen, das geschieht viermal am Tage und führt schließlich zur Depression. Im Dialog zur subjektiven Zeit steht: „Minuten werden zu Stunden“ und „Tage verfliegen“.

Diese und weitere Effekte lassen sich relativ gut erklären, wenn angenommen wird, dass unser Zeitgefühl | Zeiterleben wesentlich durch Ereignisse bestimmt wird und deren Repräsentation im Gedächtnis (s.S. 447) bestimmt wird. Als Ereignis gelte dabei, dass irgendetwas geschieht, was wir (bewusst) wahrnehmen und was uns irgendwie betrifft, d.h. uns beeinflusst. Für Ereignisse lassen sich dabei vielfältige Unterscheidungen angeben:

1. Ganz formal können Ereignisse durch zwei **Parameter** beschrieben werden:
 - sie sind von sehr verschiedener **Dauer** Δt und
 - sie besitzen für uns recht unterschiedliche Bedeutung, ein **Gewicht** G und zwar je nachdem wie stark sie unsere Hoffnungen, Wünsche, Bedürfnisse, unsere Zukunft usw. betreffen.
2. Etwa in der folgenden Reihenfolge nimmt dabei das **Gewicht** der Ereignisse ab,
 - die ganz oder nahezu *einmalig* sind (Geburt eines Kindes, Hochzeit, bestandene Prüfung usw.),
 - die sich mit deutlichen *Abweichungen wiederholen* (beim sonst gleichartigen Zähneputzen zerbricht die Zahnbürste, eine Plombe löst sich usw.) oder
 - die sich sehr ähnlich bis *gleichartig wiederholen* (Jahreszeiten, Tag-Nacht, Einschlafen, Erwachen usw.).
3. Viele Ereignisse haben eine **Abhängigkeit von anderen**. So gibt es jene,
 - auf die wir keinen Einfluss haben, die einfach und unabänderlich für uns eintreten (Geburt, Tod, Krankheit, Wetter, Tag-Nacht),
 - die andere Menschen für uns festlegen und daher anders sein könnten, wenn ... (Verkehrsstau, Geschehen in der Wirtschaft oder Politik),
 - die wir teilweise mitbestimmen, wo wir aktiv beteiligt sind (Geldanlage, Lotterie oder Prüfung),
 - für deren Eintreten wir voll und ganz Verantwortung tragen (Einkaufen, Brief schreiben, Körperpflege, Text lesen, Gedanken über etwas machen).
4. Schließlich sind in Ereignisse z.T. auch **andere Menschen einbezogen**, daher können sie
 - auch Mitmenschen betreffen oder
 - eher individueller Natur sein.

Trotz dieser, noch keineswegs vollständigen Vielfalt der Ereignisse sei im weiteren eine hinreichend klare Definition von Ereignissen angenommen. Unser Erleben kann dann vereinfacht in zwei deutlich unterschiedliche Erlebnisarten mit jeweils zwei Eigenschaften eingeteilt werden:

- A. Wir erleben bewusst eine **subjektiven Gegenwart**, die vielfach mit einer Dauer von 10 Sekunden angenommen wird. Sie liegt also zwischen der Vergangenheit und der Zukunft. In ihr sind zu unterscheiden:
 - Es findet ein Ereignis statt, dann „erleben“ wir keine Zeit sondern nur das Ereignis: Die Zeit vergeht wie im Fluge.
 - Es findet kein Ereignis statt, so warten wir auf das kommende Ereignis oder sorgen eventuell aktiv dafür (das ist bereits ein Ereignis). Aber bis das nächste Ereignis eintritt, empfinden wir deutlich den Ablauf der Zeit, und wenn das Warten länger dauert, tritt die befürchtete Langeweile auf. Formal kann dies auch durch $G = 0$ beschrieben werden.
- B. Schauen wir nach **rückwärts** auf unsere früheren Erlebnisse – also in die **Vergangenheit** – so erscheint vieles deutlich anders:
 - Wo und wann etwas geschah und was dort geschah, daran können wir uns zumindest teilweise gut erinnern und gewinnen dabei eine „Gefühl“ wie lange es gedauert haben mag.
 - Wo nichts geschah, haben wir auch keine Erinnerung und daher erscheint die zugehörige Zeitspanne sehr klein.

Unser Gedächtnis ist also wahrscheinlich so angelegt, dass wir Ereignisse in bestimmter Weise speichern. Die Ereignisse, die wir erleben werden einmal je nach ihrem Gewicht G mehr oder weniger vollständig gespeichert.

Außerdem geht auf die Menge der gespeicherten Information auch die Zeitdauer Δt ein. Dadurch ist die *gespeicherte Informationsmenge* etwa proportional $\Delta t \cdot G$. Dass wir beim Erleben (entspricht dem Speichern) keine Zeit „erleben“ scheint sogar eine allgemeine Eigenschaft jeder (auch technischer) Speicherung zu sein. Sie besteht ja gerade darin, dass die aktuelle Gegenwart für die Zukunft „konserviert“ wird.

Die geschilderten Vorgänge demonstriert **Bild 21**. Im Teil A) läuft die physikalische (objektive) Zeit linear ab.

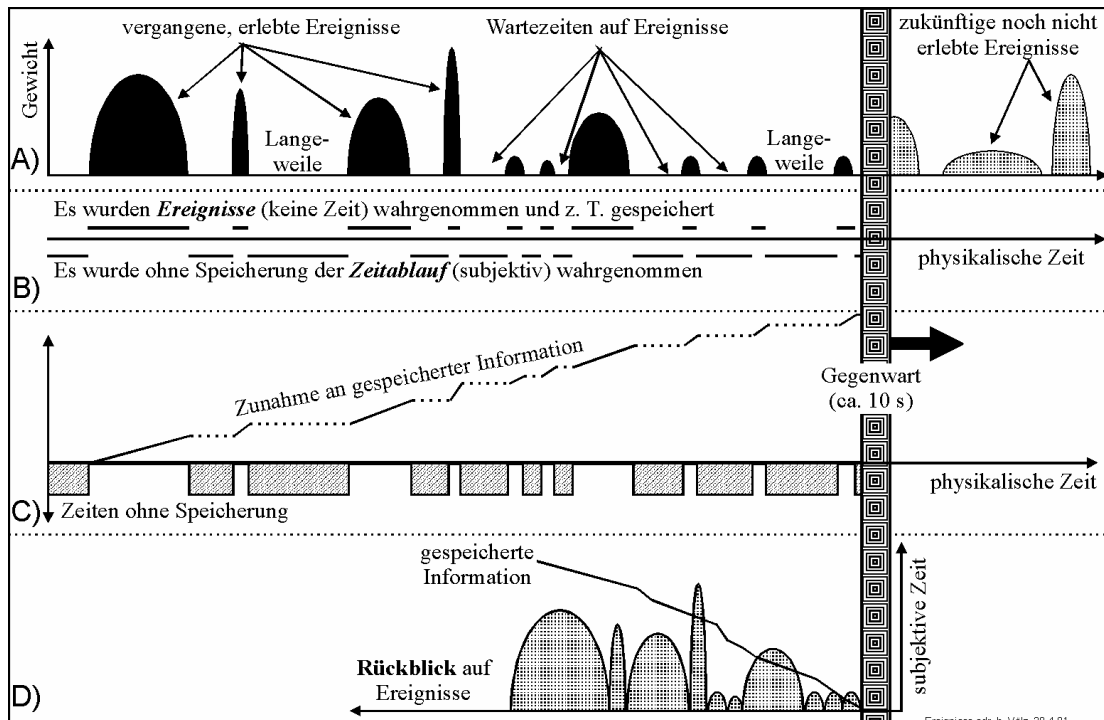


Bild 2 Ereignisse in Gegenwart und im Rückblick auf die gespeicherte Vergangenheit

Dabei bewegt sich der Gegenwartsbereich (ca. 10 s) von links nach rechts. Die bereits erlebten Ereignisse befinden sich als schwarze Flächen links. Hiervon wurden Gedächtnisinhalte angelegt (Teil B). Dabei nimmt die Informationsmenge im Gedächtnis zu und zwar je nach Gewicht und Zeitdauer. In den „leeren“ Pausen erfolgt keine Speicherung, wir fühlen den Ablauf der Zeit. Die veranschaulicht Teil C). Blicken wir nun in die Vergangenheit, so existieren nur die gespeicherten Informationen, die „Lücken“ ohne Ereignisse fehlen. Die (subjektive) Zeit schrumpft daher auf das Erlebte zusammen (Teil C). So erklärt sich die bekannte Erfahrung, dass Zeiten, in denen wir uns gelangweilt haben, rückwirkend so gut wie nicht existieren. Zeiten, in denen wir dagegen viel erlebt haben, erscheinen rückwirkend teilweise sogar verlängert.

Doch die Zusammenhänge sind noch komplizierter. Dies wird dann deutlich, wenn sich wiederholende Ereignisse betrachtet werden (**Bild 22**). Hier gilt, dass bei neuen Erlebnissen, also beim ersten Mal, alles recht intensiv erlebt wird. Bei jeder Wiederholung verringert sich jedoch deutlich die Wirkung, also das Gewicht. Vereinfacht kann angenommen werden, dass das Gewicht mit bei der n -ten Wiederholung nur G/n beträgt. Werden alle übrigen Zeiten und Ereignisse ausgeblendet, so gilt Bild 22 Teil A). Die Informationszunahme (Teil B) nimmt also deutlich von Mal zu Mal ab. Doch im Rückblick kommt einer weiterer Effekt zur Wirkung: Der Zufluss aus unserem Gedächtnis in unser Bewusstsein ist etwa konstant (Richtwert 15 Bit/s, vgl. S. 447f). Daher muss nun die Speicherkurve linearisiert werden (Teil C). Obwohl alle Wiederholungen gleichlang, also Δt waren, tritt die n -te Wiederholung so ins Bewusstsein, als wäre sie um $1/n$ (sicher eine vereinfachende Annahme) verkürzt. Die wirksamen Effekte bei Wiederholung von Ereignissen sind also:

- Bei einer Wiederholung erlangt ein Ereignis nur ein geringeres Gewicht und bewirkt daher auch weniger Speicheraufwand.
- Bei der Erinnerung wird diese geringere Informationsmenge jedoch mit der für jeden Gedächtnisinhalt gleichen Datenrate ins Bewusstsein geholt. Wiederholte Ereignisse erscheinen daher also deutlich verkürzt.

Auf dieser Basis lässt sich nun relativ leicht ein weiterer Effekt erklären: Mit *zunehmenden Alter* scheint die *subjektive Zeit deutlich schneller* abzulaufen. Je älter wir werden, desto weniger wirklich Neues erleben wir. Die Wiederholungen werden also immer häufiger. Rückblickend ist daher in den letzten Jahren meist deutlich weniger Information gespeichert als früher. Dies ist weiter ein Grund dafür, warum erst ältere Menschen oft Ereignisse wahrnehmen, die ihnen als sie Kinder waren, so selbstverständlich erschienen, dass sie keine Bedeutung erlangten

(z.B. das Blühen im Frühling). Da Ältere weniger Neues erleben, gleichen sie dies teilweise durch eine differenzierte Betrachtung von Ereignissen aus.

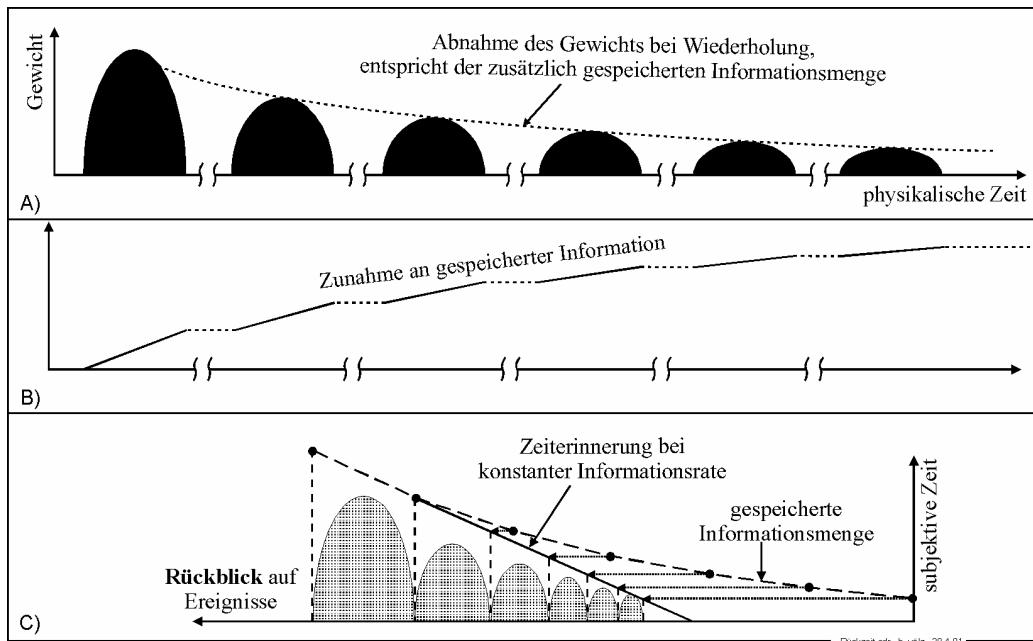


Bild 3 Beim Rückblick auf Ereignisse, die sich wiederholten, wird das Gewicht ständig kleiner. Infolge einer konstanten „Datenrate“ schrumpft ihre subjektive Zeit noch weiter zusammen

Neue Ergänzungsbilder zur Entropie Welt usw.

Boltzmann- und Shannon-Entropie

thermodynamisch und informationstheoretisch

Es gibt eine Urne mit zwei Vertiefungen, in die eine Kugel geworfen wird. Dann sei die Wahrscheinlichkeit dafür, in welches Loch sie gelangt, gleich 1/2

1/2

1/2

Es werden jetzt zwei ununterscheidbare Kugeln geworfen, dann existieren die drei Fälle mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten

A
1/4

B
1/2

C
1/4

Die **Boltzmann**-Entropie berechnet sich gemäß

$$S = k \cdot \ln(W)$$

Sie sagt aus, daß der Zustand **B** der wahrscheinlichste ist und bei freier Entwicklung von der Natur angestrebt wird.

Die Schnelligkeit der Entwicklung nimmt der absoluten Temperatur T zu, weil dann mehr Wärmeenergie zur Überwindung von Barrieren zur Verfügung steht.

Die Boltzmann-Konstante k ist nur ein Maßstabsfaktor für viele Atome.

Bei der **Shannon**-Entropie (Neg-Entropie) gilt entsprechend:

$$H = - \sum_{v=1}^n p_v \cdot \lg(p_v)$$

Hier ist also zu rechnen:

-1/4 * lg(1/4)	(-1/4 * -2)
-1/2 * lg(1/2)	(-1/2 * -1)
-1/4 * lg(1/4)	(-1/4 * -2)

das ergibt:

$$H = 1/2 + 1/2 + 1/2 = 1,5$$

und besagt, daß im Idealfall mit 1,5 Entscheidungsfragen der eingenommene Zustand zu bestimmen wäre.

Beide Entropien enthalten also die Wahrscheinlichkeit, aber für unterschiedliche Aussagen B-Entropie bestimmt das Auftreten eines Zustandes und die Tendenz der Natur S-Entropie bestimmt die Unsicherheit, daß heißt den minimal nötigen Aufwand zur Bestimmung eines Zustandes.

Auf keinen Fall gilt so etwa wie S-Entropie + B-Entropie = konstant

50 Atome

10²⁸ Jahre warten bis

alle Atome in einem der Felder sind

oder hier

z.B. hier

oder hier

Bezüglich der Welt gilt

Urknall vor 1,5·10 ¹⁰ Jahren	heute	totale Gleichverteilung irgendwann sehr viel später
relative Entropie = 1	10 ⁸⁸ -Fach	10 ⁸⁸ ·10 ¹²³ = 10 ²⁰³ -Fach

$S = k \cdot \ln(W)$ Wartezeit proportional $\Rightarrow W = e^{S/k}$

Entropie_Werte.cdr h.völz 5.5.06

Gegeben:

2 unterscheidbare Urnen je 2 unterscheidbare Zeichen

Die Zeichen fallen mit gleicher **Wahrscheinlichkeit** in die Urnen.
Dann ergeben sich die folgende 7 Zustände

A)

1/4

B)

3/16

C)

1/8

D)

1/16

Shannon-Entropie

$$H = -[1 \cdot 1/4 \cdot \ln(1/4) + 2 \cdot 3/16 \cdot \ln(3/16) + 2 \cdot 1/8 \cdot \ln(1/8) + 2 \cdot 1/16 \cdot \ln(1/16)]$$

$$= 1/2 + 3/8 \cdot 2,348 + 3/4 + 1/2$$

$$= 0,5 + 0,8805 + 0,75 + 0,5$$

$$= \mathbf{2,6305}$$

Fragen um je einen Zustand zu bestimmen

Thermodynamische Entropie

$$S_A = -k \cdot \ln(1/4) = -k \cdot 1,3863; \quad S_B = -k \cdot \ln(3/16) = -k \cdot 1,6740$$

$$S_C = -k \cdot \ln(1/8) = -k \cdot 2,0794; \quad S_D = -k \cdot \ln(1/16) = -k \cdot 2,7726$$

relative Energiegewinne

entropien4.cdr h.völz 19.5.03