

Lothar Kolditz (MLS)

## Entropie, Information und Energie, Feldwirkung und Verschränkung

Vortrag in der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften am 09. 03. 2017

Veröffentlicht: 14.03.2017

Diese Ausführungen stellen eine Erweiterung des Vortrages „Entropie, Selbstorganisation und Evolution, der Energieaustausch“ dar [1]. Es handelt sich um ein wissenschaftlich anspruchsvolles Betrachtungsgebiet, welches allgemeinem Verständnis nicht sofort zugänglich ist, das aber dennoch einen erheblichen Einfluss auf unsere Weltanschauung ausübt.

Zunächst werden verschiedene Entropiearten betrachtet und in der Form des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik auf die ihnen zutreffenden Bereiche angewendet.

Es sei daran erinnert, dass die thermodynamische Entropie von Rudolf Clausius (1822-1888) zur Beschreibung von thermodynamischen Kreisprozessen eingeführt wurde. Das Differential der Entropie ist für reversible Vorgänge das Verhältnis von übertragener Wärme  $\delta Q_{rev}$  zur absoluten Temperatur  $T$

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Auf Grund der Überlegungen von Ludwig Boltzmann (1844-1906) formulierte Max Planck (1858-1947) die Gleichung

$$S = k \ln W,$$

wonach die Entropie dem Logarithmus der möglichen Mikrozustände proportional ist. Das statistische Gewicht der möglichen Mikrozustände ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Zustandes, daher der Buchstabe  $W$ . Die Proportionalitätskonstante  $k$  ist die Boltzmann-Konstante

$$k = R/N,$$

die die allgemeine Gaskonstante  $R$  bezogen auf die Avogadro-Konstante  $N$ , der Anzahl der Teilchen in einem Mol darstellt.

In einem geschlossenen System kann die Entropie nur ansteigen, was am Beispiel des Mischvorganges zweier in getrennten Behältern vorhandener reiner Gase gezeigt wird, der nach Öffnen der Trennwand abläuft. Beim Mischvorgang erhöhen sich die möglichen Mikrozustände gegenüber den Zuständen der reinen Gase, die Entropie steigt an und die Unordnung im System ebenfalls. Der Mischvorgang wird durch die Gleichung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik beschrieben, der die Entropie beinhaltet:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Die Schreibweise  $\Delta$  bezieht sich auf den Vergleich der betrachteten Größen zum Beginn und am Ende des Vorganges. Dabei steigt  $\Delta S$ , die Entropie, an, ist also positiv, während  $\Delta G$ , die freie Energie, negativ erscheint (Energieabgabe vom System).  $\Delta H$  stellt den Energieaustausch in den Mikrozuständen beim Mischvorgang dar, nämlich den Übergang der Van-der-Waals-Wechselwirkung der reinen Gase zum Zustand in der Gasmischung [1], er hat einen nur geringen Wert und wird vom Entropieglied überspielt.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik bestimmt mit der Entropie die Richtung der ablaufenden Prozesse. In einem geschlossenen System werden sich zwei Gase mischen, aber nicht selbstständig entmischen. Letzteres kann nur durch Energiezufuhr von außen erfolgen, etwa durch Abkühlen und Verflüssigen der Gasmischung mit anschließender Destillation.

Nach dem zweiten Hauptsatz erfolgt die Übertragung von Wärmeenergie ohne äußere Einwirkung auch stets von einem Körper höherer Energie auf einen Körper niedrigerer Energie und nicht umgekehrt. Es ist ebenfalls nicht möglich, eine Last zu heben durch bloße Abkühlung eines Wärmereservoirs.

Die Entropie ist eine Größe von allgemeiner Bedeutung, deren Wirksamkeit nicht nur auf die thermodynamischen Kreisprozesse beschränkt bleibt. Wichtig ist, dass in allen Gebieten die als Entropie bezeichnete Größe die charakteristischen Eigenschaften der ursprünglichen Entropie aufweist:

1. Sie genügt der Beziehung  $S = k \ln W$ .
2. Sie steigt in geschlossenen Systemen bei Prozessablauf an und verringert die Ordnung.
3. Sie folgt der Beziehung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik.

Die Entropie ist auch von Einfluss bei allen chemischen Reaktionen, die durch Lösen und Knüpfen von Bindungen zwischen Atomen gekennzeichnet sind.

Bei den chemischen Reaktionen sind außer der Entropie noch Reaktionsenergien zu berücksichtigen, die bei den Umsetzungen frei oder gebunden werden. Diese Vorgänge werden erfasst durch die oben angeführte Gleichung des zweiten Hauptsatzes.

$\Delta H$  wird bei Ablauf der Reaktionen unter konstantem Druck als Reaktionsenthalpie bezeichnet,  $\Delta G$  als freie Enthalpie. Die Bezeichnung Energie ist vorgesehen bei Reaktionen unter konstantem Volumen.

Ein chemischer Vorgang kann ablaufen, wenn die freie Enthalpie  $\Delta G$  negativ wird. Ob der Vorgang in der Wirklichkeit eintritt, hängt von der Überwindung von Reaktionsschranken ab, die in der Reaktionskinetik beschrieben werden.

Zum Ablauf einer Reaktion ist die Überwindung einer Aktivierungsenergie notwendig, was Energiezufuhr von außen erfordert. Die Aktivierungsenergie kann durch Katalysatoren erniedrigt werden, die die Reaktion steuernd beeinflussen und im gesamten Lebensprozess eine herausragende Rolle spielen.

Das Auftreten von Reaktionsschranken ist Voraussetzung für die Existenz von Leben, denn ohne sie wären bei Sauerstoffüberschuss alle organisch-chemischen Verbindungen, die das Funktionieren von Leben ermöglichen, nicht von Bestand. Sie würden je nach Zusammensetzung zu  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  und Stickstoff oxidiert werden.

## Die Erweiterung des Entropiebegriffes

Die Entropie spielt nicht nur eine Rolle bei physikalischen und chemischen Vorgängen. Sie hat darüber hinausgehend allgemeine Bedeutung.

In diesem Zusammenhang wird die der Form des zweiten Hauptsatzes entsprechende Gleichung

$$F_i = E_i - \varphi E_i / v_i$$

genannt [2].  $F_i$  ist der als Energiegröße aufgefasste freie Antrieb für eine Handlung eines Individuums,  $E_i$  die zugehörige Erfahrung des Individuums mit der Dimension Energie,  $v_i$  die Aufnahmekapazität des Individuums für die Erfahrung  $E_i$ . Sie ist bestimmt durch die maximale Erfahrungsenergieaufnahme für den betreffenden Vorgang. Die Größe  $\varphi$  entspricht der Gesamtaufnahmekapazität des Individuums für Erfahrung.

$E_i / v_i$  hat Entropiecharakter.  $E_i$ , die Erfahrung, wird vom Individuum aufgenommen. Sie ist als Aufnahme immer positiv. Auch negative Erfahrung ist mit positiver Energieaufnahme verbunden. Die Aufnahmekapazität für die Erfahrung des Individuums  $v_i$  muss ebenfalls positiv sein. Die Größe  $E_i / v_i$  nimmt also während des ablaufenden Vorganges zu wie analog die thermodynamische Entropie. Die

möglichen Mikrozustände werden erhöht, die Wahrscheinlichkeit des Gesamtzustandes erhöht sich ebenfalls.

Die freie Energie des Antriebs  $F_i$  muss für eine mögliche Handlung negativ sein, d. h. ein positives  $E_i$  muss durch das Entropieglied  $\varphi E_i / v_i$  überkompensiert werden.

Die Gleichung für  $F_i$  kann für einen einmaligen Erfahrungsprozess stehen oder aber für mehrere auf den gleichen Prozess gerichtete Erfahrungen zutreffen. In diesem Fall ist  $n$  Laufzahl für die Einzelprozesse. Summierung liefert das Gesamtergebnis.

$$\sum F_n = \sum E_n - \sum \varphi E_n / v_n$$

Die Summierung lässt sich auch auf eine ganze Gruppe von handelnden Personen ausdehnen.

Ein negativer Wert von  $F$  drückt aber nur die Möglichkeit der Handlung aus. Ob sie wirklich eintritt, hängt von Überwindung von Hemmschwellen ab, die individuell verschieden sind und von außen (vgl. Katalysatoren bei chemischen Reaktionen) zu beeinflussen sind. Diese Verhältnisse entsprechen also der Reaktionskinetik bei chemischen Reaktionen.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, dass die dem zweiten Hauptsatz entsprechende Beziehung nicht nur für Handlungen gilt, sondern ebenfalls auf die Entwicklung mentaler Einstellungen anzuwenden ist, also auch für die Entwicklung von Ansichten gilt. Wiederum wird in der Beziehung lediglich die Richtung angegeben. Die Realisierung ergibt sich nach charaktergebundener Überprüfung und Überwindung geistiger Blockaden bei den Individuen.

## Der Maxwellsche Dämon

Wir haben verschiedene Gebiete in der Wirksamkeit des zweiten Hauptsatzes betrachtet und dabei seine unbeschränkte Gültigkeit vorausgesetzt. Der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) entwickelte neben den nach ihm benannten Gleichungen zum Elektromagnetismus die kinetische Gastheorie und gilt mit Ludwig Boltzmann (1844-1906) als Begründer der statistischen Mechanik. Die Verteilung der Geschwindigkeit von Gasmolekülen ist als Maxwell-Boltzmann-Verteilung bekannt.

Maxwell veröffentlichte 1871 ein Gedankenexperiment, das den zweiten Hauptsatz in Frage stellen sollte [3]. Er ging von einem Wesen aus, dessen Sinne so geschärft sind, dass es die Moleküle sehen und verfolgen kann. Es sei nun ein Gasvolumen vorhanden, das durch eine Trennwand in die Bereiche A und B aufgeteilt ist. In der Trennwand befindet sich ein Loch, das durch dieses Wesen geöffnet und geschlossen werden kann. Dazu braucht es unter idealen Bedingungen keine Arbeit zu verrichten. Das Wesen lässt nun durch Öffnen und Schließen des Loches schnellere Moleküle von A nach B gelangen, nicht aber zurück. Dafür erlaubt es langsameren Molekülen nur den Übergang von B nach A. Damit würde, ohne Arbeit zu verrichten, ein Temperaturunterschied zwischen A und B erzeugt, was dem zweiten Hauptsatz widerspricht. Mit Hilfe des Dämons<sup>1</sup> wäre der Bau eines perpetuum mobile 2. Art möglich.

Die Erfahrung lehrt, dass es oftmals gar nicht leicht ist, den gedanklichen Fehler in einer Behauptung zum Bau eines perpetuum mobile 1. Art nachzuweisen, also eine Maschine zu konstruieren, die ohne Energiezufuhr von außen ständig läuft.

Das Gleiche gilt für den Maxwellschen Dämon. Unter den verschiedenen Bemühungen bis in die heutige Zeit soll der Gedankengang von Leó Szilárd (1898-1964) hervorgehoben werden, der in seiner Habilitationsschrift „Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen“ 1929 wohl zum ersten Mal die Begriffe Information und Entropie miteinander verband [5].

Szilárd konstruierte ein Modell, das nur ein Molekül in einem Bereich enthält, der durch einen Kolben in A und B unterteilt werden kann. Befindet sich das Molekül in B, rückt der Kolben, ohne

---

<sup>1</sup> Diese Bezeichnung in Analogie zum Dämon von Laplace stammt von Lord Kelvin [4].

Arbeit zu benötigen, in A vor. Das Molekül in B drückt nun den Kolben in den Bereich A zurück, wobei Arbeit an einem Gewicht verrichtet wird. Gleichzeitig wird Wärmeenergie aus der Umgebung aufgenommen, die Temperatur bleibt gleich. Wiederholen des Vorganges erzeugt Erhöhung der potentiellen Energie des Gewichtes. Die Auflösung des Widerspruchs zum zweiten Hauptsatz liegt in der Information, die das Wesen erlangen muss. Es muss die Hälften des Bereichs beobachten und messen, ob das Molekül darin enthalten ist oder nicht. Die thermodynamische Entropieverringerung beim Vorgang wird durch die Messung mit einem gleichen Betrag ausgeglichen, der von Szilárd zu

$$S = k \ln 2$$

berechnet wurde.

## Shannon-Entropie, Information und Energie

Unser Zeitalter wird durch Information geprägt. Es wird sogar danach benannt. Eine neue Wissenschaftsdisziplin, die Informatik, ist entstanden. Alle Bereiche unseres Lebens werden durch Big Data, die große Datenflut, erfasst [6]. In der Leibniz-Sozietät wurde im Juni 2015 der Arbeitskreis „Emergente Systeme – Informatik und Gesellschaft“ gegründet, der im Dezember 2015 seine Tätigkeit aufnahm.

Zum Thema „Informatik und Gesellschaft“ wurde eine Festschrift anlässlich des 80. Geburtstages von Klaus Fuchs-Kittowski von Frank Fuchs-Kittowski und Werner Kriesel herausgegeben [7]. In einem bemerkenswerten Beitrag in dieser Festschrift gibt Werner Ebeling eine Einschätzung zum Informationsbegriff. Als weit verbreitete Ansicht wird vertreten, dass Information im Laufe der Evolution durch Selbstorganisation entsteht. Information ist eine austauschbare Größe, welche eng mit Entropie und Energie verknüpft ist [8]. Die allgemein bekannte Aussage von Norbert Wiener „Information ist weder Energie noch Materie“ ist richtig, aber nicht vollständig. Zu ergänzen wäre: Jedoch ist zur Informationsübertragung Energie und Materie notwendig.

Claude Elwood Shannon (1916-2001) veröffentlichte 1948 seine für die Informationstheorie grundlegende Arbeit „A Mathematical Theory of Communication“ mit der die Shannon-Entropie in der Informationstheorie eingeführt wurde [9].<sup>2</sup>

Die Entropie in der Informationstheorie geht nach der Definition von Shannon aus der Zuordnung des Informationsgehaltes eines Ereignisses

$$I(p_i) = -\log_2 p_i$$

zur Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses hervor. Daraus erfolgt in der Summierung unter Einführung der Gesamtwahrscheinlichkeit  $W$  ein Wert für die Shannon-Entropie  $\eta$ , für den gilt<sup>3</sup>

$$\eta = \log_2 W.$$

Daraus folgt  $2^\eta = W$  und  $\eta \ln 2 = \ln W$

mit  $\ln$  als natürlichem Logarithmus.

Damit wird  $S = k \ln W = \eta k \ln 2.$

Anwendung auf den zweiten Hauptsatz ergibt für die Informationsübertragung

---

<sup>2</sup> Die Kolmogorow-Sinai-Entropie entspricht der Shannon-Entropie. Sie verallgemeinert diesen Entropiebegriff, gilt für dynamische Systeme und erfasst den Informationsgewinn mit jedem Schritt im dynamischen System.

<sup>3</sup> John von Neumann (1903-1957) riet Shannon zur Benennung von  $\eta$  als Entropie, weil dieser Wert mit der Beziehung  $S = k \ln W$  vereinbart werden kann und sowieso niemand genau wisse, was Entropie wirklich ist.

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta \eta \text{ k ln}2.$$

Im Gleichgewicht oder in diesem Falle bei vollzogener Informationsübertragung wird

$$\Delta G = 0$$

und somit

$$\Delta H = T \Delta \eta \text{ k ln}2.$$

$\Delta H$  ist die Energie, die benötigt wird, um eine bestimmte in  $\Delta \eta$  enthaltene Menge an Bit als Information weiterzugeben. Der Umrechnungsfaktor ist identisch mit der von Szilárd ermittelten Größe zum Entropieausgleich bei Übertragung von 1 Bit Information. Eine Informationsübertragung ist immer mit einem in der Entropie enthaltenen Energieaustausch verbunden.<sup>4</sup>

Information und Energie unterscheiden sich in einer wesentlichen Eigenschaft. In einem geschlossenen System bleibt die Energie konstant, Abgabe von Energie nach außen verringert die Energie im System, während die Information bei ablaufenden Vorgängen der Übertragung im empfangenden System zunimmt, ohne dass die Abgabe im Quellsystem eine Informationsabnahme verursacht. Das hängt mit den Eigenschaften des Informationsspeichers zusammen.

Informationsübertragung ist an Speicherplatz im Aufnahmesystem gebunden. Durch die bei der Übertragung erforderliche Energie erfolgt eine Strukturierung des belieferten Speichers.

Informationsverringering kann im System nur durch Zerstörung der Speicherstruktur eintreten entweder durch Eingriff von außen oder durch ablaufende interne Alterungsreaktionen.

Die Anwendung des zweiten Hauptsatzes hat stets ergeben, dass damit die Möglichkeit von Abläufen ermittelt wird, nicht aber deren Realisierung. Zur Realisierung sind bestimmte Bedingungen einzuhalten und zu beachten, wie sie bei chemischen Reaktionen in der Reaktionskinetik oder bei handelnden Individuen in Hemmschwellen vorhanden sind. Bei der Informationsübertragung hängt die Realisierung von der Aufnahmefähigkeit und Lesbarkeit der Speicher ab.

## Entropiereduktion im Denken

Werner Krause [10] wendet die Entropie nach Art der Shannon-Auffassung auf den Denkprozess an und vergleicht Hochbegabte mit Normalbegabten in einer Reduktion der Entropie im Denken. Sie kann nach der von Bärbel Schack [11] entwickelten adaptiven EEG-Kohärenzanalyse ermittelt werden.

Die Entropiereduktion erweist sich nach Werner Krause für Hochbegabte (HB) größer als für Normalbegabte (NB).

$$S_{redHB} > S_{redNB}$$

Die Einführung der Entropiereduktion im Denken in den zweiten Hauptsatz erfordert die Umschreibung auf die Energiedimension durch Multiplikation mit der absoluten Temperatur T in der allgemeinen Gleichung

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S.$$

Bei Problemlösungsprozessen wird  $\Delta G$  für den Prozessablauf negativ und nach erfolgter Lösung gleich Null. Es gilt dann für den Energieverbrauch während des Prozesses

$$\Delta H = T \Delta S.$$

---

<sup>4</sup> In der Diskussion zum Vortrag [1] wurde die Verwendung der üblichen Bezeichnung Energieaustausch für sämtliche Energiewechsel in Frage gestellt. Die Bezeichnung Energieübertragung dafür ist aber nach meiner Überlegung nicht vorzuziehen. Ein Austausch muss nicht in jedem Fall Gegenseitigkeit bedeuten. Energiefluss in eine Richtung ist nach der hier verwendeten Definition ebenfalls ein Austausch.

Als  $\Delta S$  ist die nach Entropiereduktion verbleibende Restentropie einzusetzen. Im Vergleich für Hochbegabte und Normalbegabte trifft dafür zu

$$\Delta S_{HB} < \Delta S_{NB}.$$

Daraus folgt, dass Hochbegabte für einen Problemlösungsprozess weniger Energie verbrauchen als Normalbegabte.

$$\Delta H_{HB} < \Delta H_{NB}$$

Die Beziehung gilt für einen Durchschnittswert. Bei Realitätsumsetzung mit einzelnen Individuen werden unterschiedliche Aktivierungsschwellen das Erreichen des Endergebnisses bestimmen. Sie werden bei Hochbegabten kleiner sein als bei Normalbegabten.

## Verschränkung

Bei allen von unseren Betrachtungen, in denen Energien auftreten, spielen Kräfte eine Rolle, die in Feldern wirken. Es ist nun angebracht, dass wir uns mit Kraftfeldern und der Feldwirkung befassen. In diesem Zusammenhang ist ein quantenphysikalischer Begriff, die Verschränkung, zu beachten. Sie bezieht sich auf einen Zustand von Quantenteilchen, die so eng zusammenhängen, dass durch Beeinflussung an einem Teilchen sofort die Eigenschaft des anderen Teilchens bestimmt ist, auch wenn sie sich deutlich getrennt voneinander aufhalten [vgl.12].

Louis de Broglie (1892-1987) forderte in seiner Doktorarbeit 1924 die Zuordnung einer Wellennatur für bewegte Teilchen mit der Materiewellenlänge

$$\lambda = h / mv,$$

was zur Entwicklung der Quantenwellenmechanik führte. Dabei ist  $h$  die Plancksche Konstante,  $m$  die Masse und  $v$  die Geschwindigkeit des Teilchens.

Erwin Schrödinger (1887-1961) fand 1926 die nach ihm benannte Gleichung, die mit ihrer Funktion  $\psi$  den quantenmechanischen Zustand eines Systems beschreibt. Mit ihrer Hilfe lässt sich die chemische Bindungsenergie berechnen oder abschätzen. Das Quadrat der Wellenfunktion  $\psi$  für Elektronen in der Atomhülle gibt die Dichte ihrer Aufenthaltswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von den jeweiligen Energieniveaus an, woraus sich bei Atomkopplungen die Bindungsrichtungen ergeben.

Die Verschränkung in der Physik steht im Einklang mit der quantenmechanischen Formulierung. Albert Einstein (1879-1955) konnte sich aber mit der Verschränkung nicht anfreunden und bezeichnete sie als spukhafte Fernwirkung. Er veröffentlichte zusammen mit Boris Podolsky und Nathan Rosen eine Arbeit mit dem Titel „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“ [13].

Die Autoren fordern für eine vollständige Theorie die Gültigkeit des Realitätskriteriums. Jedes Element der physikalischen Realität muss ein Gegenstück in der physikalischen Theorie haben.

Einstein, Podolsky und Rosen betrachteten zwei Systeme mit ihren Wellenfunktionen  $\psi$ , die eine bestimmte Zeit in Wechselwirkung stehen und nach dieser Zeit keine Wechselwirkung mehr aufweisen. Da die beiden Systeme zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr in Wechselwirkung stehen, kann nach den Autoren auch keine wirkliche Änderung in dem zweiten System als Folge von irgendetwas auftreten, das in dem ersten unternommen wird. Später wurde diese Annahme als Lokalitätsannahme bezeichnet.

Damit sind Ausführungen in der Quantenphysik nicht vollständig in Übereinstimmung zu bringen, so dass die Autoren zu dem Schluss kommen, dass die Beschreibung der Realität durch die Wellenfunktion nicht vollständig ist.

Erwin Schrödinger wurde daraufhin zu einer dreiteiligen Veröffentlichung in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* angeregt mit dem Thema „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“ [14]. In diesen Ausführungen hat er den Namen Verschränkung eingeführt. Schrödinger wies darauf hin, dass bei Wechselwirkung zweier Systeme unter Verschränkung nicht etwa ihre  $\psi$ -

Funktionen in Wechselwirkung treten, sondern sofort aufhören zu existieren und an ihre Stelle eine einzige  $\psi$ -Funktion tritt.

Die Erfolge der Quantenmechanik mit der Schrödinger-Gleichung ließen das Interesse an der Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen zurücktreten, bis im Jahre 1964 John Stewart Bell (1928-1990) eine Ungleichung aufstellte, die erfüllt sein muss, wenn die Einstein-Podolsky-Rosen-Bedingung gilt. Bell zeigte, dass die Annahme von Einstein, Podolsky und Rosen im Widerspruch zu quantenmechanischen Aussagen steht [15], die die Bellsche Ungleichung nicht erfüllen.

Die Bedeutung der Bellschen Ungleichung wurde nicht sofort erkannt. Es gab zwar einige Ansätze [16], die aber weniger Beachtung fanden. Erst nach Ablauf von fast zwei Jahrzehnten erfolgte eine präzisere experimentelle Überprüfung der theoretischen Arbeit von Bell mit verschränkten Photonen<sup>5</sup>.

Bei den Messungen wurde als Eigenschaft die Polarisierung der Photonen verfolgt [17, 18, 19]. Die Versuchsanordnung [18, 19] sah nach Erzeugung der verschränkten Photonen die Einkoppelung in Glasfaserkabeln und Weiterleitung zu den entfernten Stationen A und B vor. Bei A erfolgte die Aufprägung der in der Verschränkung zu teleportierenden Eigenschaft und Weitergabe der Information darüber über Funk an B zur Überprüfung. Bei Funk wird die Lichtgeschwindigkeit von etwa 300000 km/sec wirksam, in Glasfaserkabeln gilt eine Lichtgeschwindigkeit von etwa 200000 km/sec.

Alain Aspect und Mitarbeiter wiesen mit verschränkten Photonen, die bei Messung bis zu 6,5 m vom Zentrum entfernt waren, die Verletzung der Bellschen Ungleichung nach [17], was allerdings wegen der geringen Entfernung und der gewählten experimentellen Anordnung noch Einwände zuließ [16].

Ausführlichere Untersuchungen zur Quantenteleportation erfolgten durch Anton Zeilinger und Mitarbeiter. Sie veröffentlichten erfolgreiche Untersuchungen an 600 m entfernten [18] und an 143 km entfernten verschränkten Photonen [19].

Chinesische Forscher hatten inzwischen eine Entfernung von etwa 100 km überbrückt [20].

Die Verletzung der Bellschen Ungleichung wurde in allen Versuchen nachgewiesen. Die in A aufgeprägte Eigenschaft wird sofort in B wirksam.

Arbeiten, die diese Ergebnisse in Frage stellen, sind nicht bekannt. Damit gilt die Verschränkung auch als experimentell nachgewiesen und der Einsteinsche Zweifel als entkräftet. Für die verschränkten Photonen trifft weder das Realitätskriterium noch die Lokalitätsannahme zu.

Verschränkte Teilchen unterliegen der Kraftwirkung ein und desselben Feldes. Sie sind miteinander verbunden und haben nach Erwin Schrödinger dieselbe  $\psi$ -Funktion. Unter diesen Umständen wird durch die Messung an einem Teilchen sofort die Eigenschaft des anderen Teilchens bestimmt, wie weit es auch von diesem entfernt ist. Die Teilchen hängen im Feld zusammen, auch wenn sie sich an verschiedenen Orten befinden. Die Verschränkung gilt im gesamten Feld.

Im Aufbau befindet sich in China eine 2000 km lange Teststrecke zwischen Peking und Shanghai. Im Quantum Space Satellite Programme der Chinesischen und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wurde im August 2016 ein 600 kg schwerer Satellit in ungefähr 1000 km Flughöhe geschickt. Er enthält Emitter und Empfänger für verschränkte Photonen neben verschiedenen Hilfseinrichtungen zur Durchführung und Überprüfung der Space-Teleportation [21].

## Erweiterung zur Art verschränkter Teilchen, Einbeziehung der Information

Bisher sind nur Elementarteilchen bezogen auf Wellennatur und Verschränkung betrachtet worden. Es ist die Frage, ob größere zusammengesetzte Teilchen auch bis hin zu makroskopischen Systemen in dieser Hinsicht auftreten können. Die Formel für Materiewellen von Louis de Broglie (s. o.) gibt keine Begrenzung an.

---

<sup>5</sup> Verschränkte Photonen werden in nichtlinearen optischen Kristallen erzeugt. Dabei wandeln sich Photonen eines Laserstrahles in jeweils zwei Photonen mit der halben Ursprungsenergie um.

Zeilinger und Mitarbeiter haben die Wellennatur von größeren Teilchen wie  $C_{60}$  nachgewiesen, indem sie bei einem auf einen Doppelspalt zufliegenden Molekülstrahl Interferenzerscheinungen fanden [22]. Wo die Grenzen bei makroskopischen Teilchen für die Verwendbarkeit quantenphysikalischer Betrachtungen liegen, ist nicht bekannt.

Ob die Quantenphysik auch für die Tätigkeit des Gehirns Bedeutung hat, wird von Zeilinger angesprochen. Nach der allgemeinen Meinung wird festgestellt, dass im Gehirn nicht die Bedingungen für die Isolierung von äußeren Störungen herrschen, die für den Nachweis von Quantenphänomenen Voraussetzung ist. Jede Störung von außen würde die Beobachtung des Quantenphänomens unmöglich machen. Zeilinger hält es aber dennoch für möglich, dass die Quantenphysik im Gehirn in irgendeiner Form zur Anwendung kommt und verweist auf Entdeckungen in Zusammenhang mit der Entwicklung des Quantencomputers. Es wurde gefunden, dass auch bei stärkerer Wechselwirkung der Quantenbits untereinander in einem Quantencomputer Informationen unter Ausschalten des Störeinflusses gespeichert werden können [23]. Damit würde sich auch die Möglichkeit eröffnen, dass unter besonderen Umständen eine Verschränkung von sich sehr nahe stehenden Personen über ihre Gedanken besteht (vgl. [12]).

Eine andere Art von Teilchen mit Verschränkungserscheinungen wird in der Informatik diskutiert. Bei Untersuchungen zur Bildung eines konzeptionellen Modells eines Softwaresystems hat Reinhold Schönfeld die Quantelung der Information formuliert. Interaktive Softwaresysteme haben gequantelte Beschreibungsgrößen.

Die Untersuchungen zeigen Gemeinsamkeiten zwischen dem Quantensystem der Physik und dem der Informatik. Es treten analoge Beziehungen zwischen beiden Quantensystemen auf. Sie betreffen die bekannten Prinzipien der Quantenmechanik: das Pauli-Prinzip, die Heisenbergsche Unschärferelation und die Verschränkung.

Es sind natürlich gewisse Unterschiede vorhanden, da die Quanten der Physik in Kraftfeldern auftreten und simultan wechselwirken, während die Semantikquanten in der Nachrichtenübermittlung seriell eintreffen, sich zu einer kompositionellen Semantik überlagern, den informationellen Zustand ausbilden und auf die Umgebung zurückwirken [24, 25].

## Feldwirkung und Gravitation

In unseren gesamten Betrachtungen über Entropie, Energie und Information haben Kraftfelder eine Rolle gespielt. Das Wirken von Kraftfeldern scheint allgemein das Geschehen im Universum zu bestimmen. Energieaustausch innerhalb dieser Felder ist die treibende Kraft aller Vorgänge. Als wichtigstes Feld ist das Gravitationsfeld anzusehen. Ohne Gravitation gäbe es keine Evolution. Sie schafft die Voraussetzung zur Evolution.

In Sternen wie in der Sonne ermöglicht die Gravitation die Fusionsreaktion zur Energieerzeugung. Entwicklungen zu Supernovae und ihre Explosionen mit Verteilung der Materie als Sternenstaub sind gravitationsgesteuert wie auch die erneute Kombination der Materie.

Neutronensterne, Pulsare, Quasare, Schwarze Löcher wären ohne Gravitation nicht existent. Gravitation ist die Grundlage für die Erzeugung der hohen Energien in der galaktischen und extragalaktischen kosmischen Strahlung.

Beim Gasplaneten Jupiter, der im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium besteht, verursacht die Gravitation ein Zusammenpressen des Wasserstoffs unter so hohem Druck, dass er metallische Eigenschaften annimmt und so für das Magnetfeld des Planeten sorgt.

Ewig ist das Wechselspiel zwischen Materie und Energie, gesteuert durch die nach heutiger Erkenntnis nicht abschirmbare Gravitation. Sie unterscheidet sich dadurch von anderen Grundkräften wie der starken und der schwachen Wechselwirkung in den Atomkernen und der elektromagnetischen Kraft.

Die im September 2016 in Form von Daten aufgenommenen Gravitationswellen, deren Entdeckung nach Auswertung der Daten im Februar 2016 bekannt gegeben wurde, sind entstanden durch Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit insgesamt 65 Sonnenmassen vor 1,3 Milliarden Jahren.



Drei Sonnenmassen an Energie wurden dabei in Form von Gravitationswellen abgestrahlt [26]. Eine solche Massenumwandlung wird natürlich im Gravitationsfeld unmittelbar in der Nähe ausgeglichen und im Feld weitergegeben, das durch die Nichtabschirmbarkeit eine herausragende Eigenschaft aufweist, was **die Vermutung zulässt, dass die schwere Masse im gesamten Gravitationsfeld verschränkt ist**. Das Gravitationsfeld erscheint dadurch im Ganzen als praktisch zusammenhängend und stets ausgeglichen. Massenumwandlungen in Energie (s. Gravitationswellen) werden durch die Verschränkung sofort im Gesamtfeld wirksam. In dieser Hinsicht sind Diskussionen um die Verschränkung Schwarzer Löcher interessant [27].

Diese Auffassung erfordert eine neue Bewertung der Gravitation als eine selbstständige Urkraft, deren Vereinigung mit anderen Kräften nicht geboten ist. Das würde die Zusammenführung von elektromagnetischer Kraft, von starker und schwacher Kernkraft mit der Gravitation in der Quantenmechanik, die sogenannte Quantengravitation als Aufgabe beenden, an deren Lösung Einstein und viele andere namhafte Physiker gescheitert sind. Eine neue Bewertung der Gravitation könnte auch die Rätsel um Dunkle Energie und Dunkle Materie lösen [vgl. 28,29].

Ob Paralleluniversen auftreten, können wir nicht erkennen, da wir unseren Horizont nicht zu überschreiten und zu durchdringen vermögen. Rückkehr zu einem Ausgangszustand in Form eines Urknalles würde Energieumsätze erfordern, wie sie nur durch Verschmelzen überdimensionaler Schwarzer Löcher zur Verfügung stünden. Unter diesen Bedingungen würden alle Informationen vernichtet und gleich Null, weil Strukturen fehlen, an die die Informationen gebunden sind. Ein Informationsaufbau würde erst mit der eintretenden Evolution erfolgen.

Wir kehren zurück zu der anfangs gemachten Behauptung, dass es sich bei unserem Thema um ein wissenschaftlich anspruchsvolles, dem allgemeinen Verständnis nicht sofort zugängliches Gebiet handelt, das aber erhebliche Auswirkungen auf unsere Weltanschauung hat. Von der Betrachtung der viele Wissensgebiete umfassenden Bedeutung der Entropie sind wir über die Kraftfelder zu den Grundkräften gekommen und zu Ansichten, die im Zentrum weltanschaulicher Bedeutung in der heutigen Zeit stehen.

Weiteres Nachdenken scheint aber noch die Frage nach der Rolle der Kraftfelder im Raum zu erfordern. Das muss späteren Erörterungen vorbehalten bleiben. Es ist vor allem die Auffassung vom leeren Raum, die weiteres Interesse beansprucht. Eine Anregung zu diesem Nachdenken ist das 2016 erschienene Buch von James Owen Weatherall mit dem Titel „Void – The Strange Physics of Nothing [30].

Es ist vieles in Bewegung, und wir leben in einer aufregenden Epoche in der Wissenschaft, die hoffentlich nicht durch Fehler in der Politik mit nachfolgenden Katastrophen gestört wird.

## Literatur

- [1] Lothar Kolditz, Entropie, Selbstorganisation und Evolution, der Energieaustausch, Internetzeitschrift Leibniz Online Nr. 23 [2016]. [www.leibnizsozietat.de](http://www.leibnizsozietat.de)
- [2] Lothar Kolditz, Deterministisches Chaos und Gesellschaft, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 110 [2011] 107-122.
- [3] Charles H. Bennett, Maxwells Dämon, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, Januar 1988, S. 48-55.
- [4] [https://de.wikipedia.org/wiki/Maxwellscher\\_Dämon](https://de.wikipedia.org/wiki/Maxwellscher_Dämon)
- [5] L. Szilárd, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingreifen intelligenter Wesen, Z. für Physik 53 [1929] 840-856.
- [6] Lothar Kolditz, Big Data – die große Datenflut, Theorien, Modelle und Berechenbarkeit, Internetzeitschrift Leibniz Online Nr. 18 [2015]. [www.leibnizsozietat.de](http://www.leibnizsozietat.de)
- [7] Frank Fuchs-Kittowski/Werner Kriesel (Hrsg.), Informatik und Gesellschaft, Festschrift zum 80. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski, Peter Lang GmbH, Frankfurt am Main 2016.

- [8] Werner Ebeling, Physik, Biologie, Technik und Selbstorganisation der Information, in Festschrift Informatik und Gesellschaft (s. [7].) S. 63-74.
- [9] C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal 27 [1948] 349-423; 623-656.
- [10] Werner Krause, Processing of Information in Microstates, Results of an elementary analysis of human information-processing, reconsidered, Internetzeitschrift Leibniz Online Nr. 25 [2017]. [www.leibnizsozietat.de](http://www.leibnizsozietat.de)
- [11] Bärbel Schack, Dynamic Topographic Spectral Analysis of Cognitive Processes, in Ch. Uhl (Ed.), Analysis of Neurophysiological Brain Functioning, Springer Berlin, Heidelberg, New York 1999.
- [12] Lothar Kolditz, Gedankenübertragung und quantenphysikalische Verschränkung, Internetzeitschrift Leibniz Online, Jahrgang. 2013, Nr.15, S.1-7; 3-6. [www.leibnizsozietat.de](http://www.leibnizsozietat.de)
- [13] Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review 47, [1935] 777-780.
- [14] Erwin Schrödinger, Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, Naturwissenschaften 23, [1935] 807-812; 823-828; 844-849.
- [15] John Stewart Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, Physics 1 [1964] 195-200.
- [16] Anton Zeilinger, Einsteins Spuk: Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik, 4. Auflage Taschenbuchausgabe Februar 2007, Wilhelm Goldmann Verlag München, S. 275 u. f.
- [17] Alain Aspect, Philippe Grangier and Gérard Roger, Experimental Tests of Local Theories via Bell's Theorem, Phys. Rev. Lett. 47 [1981] 460-463.
- [18] Rupert Ursin, Thomas Jennewein, Markus Aspelmeyer, Rainer Kaltenback, Michael Lindenthal, Philip Walther and Anton Zeilinger, Quantum teleportation across the Danube, Nature 430 [2004] 849.
- [19] Xiao-Song Ma, Thomas Herbst, Thomas Scheidl, Daqien Wang, Sebastian Kropatschek, William Naykor, Bernhard Wittmann, Alexandra Mech, Johannes Kofler, Elena Anisimova, Rupert Ursin and Anton Zeilinger, Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward, Nature 489 [2012] 269-273.
- [20] Juan Yin, Ji-Gang Ren, He Lu, Yuan Cao, Hai-Lin Yong, Yu-Ping Wu, Chang Liu, Sheng-Kai Liao, Fei Zhou, Yan Jiang, Xin-Dong Cai, Ping Xu, Ge-Sheng, Pan, Jian-Jun, Jia, Yong-Mei, Huang, Hao, Yin, Jian-Yu Wang, Yu-Ao, Chen, Cheng-Zhi, Peng and Jian-Wei Pan, Quantum teleportation and entanglement distribution over 100 km free-space channels, Nature 488 [2012] 185-188.
- [21] Andreas Stiller, Quantenfahrplan – wie geht es weiter mit der Quantentechnologie? c't magazin für computer technik, Heft 17 [2016], S. 40-41.
- [22] Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw and Anton Zeilinger, Wave-particle duality of C<sub>60</sub> molecules, Nature 401 [1999] 680-682.
- [23] Anton Zeilinger, Einsteins Spuk: Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik, 4. Auflage Taschenbuchausgabe Februar 2007, Wilhelm Goldmann Verlag München, S. 335 u. f.
- [24] Reinhold Schönfeld, Quantisierung in Physik und Informatik – Gemeinsamkeiten und Unterschiede, in Fuchs-Kittowski, K./Zimmermann, R.E. (Hrsg.) Kybernetik, Logik, Semiotik, Philosophische Sichtweisen, Tagung aus Anlass des 100. Geburtstages von Georg Klaus, Berlin: trafo Wissenschaftsverlag, Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften Bd. 40, S. 249-280, ISBN 978-3-86464-095-7.
- [25] Reinhold Schönfeld, Evolution des semantischen Zustandes in Softwaresystemen durch Selbstorganisation, in Festschrift Informatik und Gesellschaft (s. [7]), S. 403-409.
- [26] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswellen>

- [27] Juan Maldacena, Wurmlöcher, verschränkte Schwarze Löcher, Spektrum der Wissenschaft mbH Heidelberg, Heft 2 [2017] S. 12-18.
- [28] Adam G. Riess und Mario Livio, Kosmologie – Brisante Dunkle Energie, Spektrum der Wissenschaft mbH. Heidelberg, September 2016, S. 12-17.
- [29] Joshua Frieman, Astronomie – Das Dunkelste Geheimnis, Spektrum der Wissenschaft mbH. Heidelberg, September 2016, S. 18-26.
- [30] James Owen Weatherall, Void – The Strange Physics of Nothing, Yale University Press, New Haven CT (Foundational Questions in Science) [2016].

Adresse des Verfassers: lothar.kolditz@t-online.de