

Informationsprobleme

Autor:

Dokumentenstatus:

Quelle:

Paul A. Truttmann, Mai 2023

provisorisch

«Sich lichtende Nebel» von Christian Haller, Hinweis auf das Buch von Richard Egger.

1 Die zwei Grabsteine

«Sich lichtende Nebel»

Der Schriftsteller Christian Haller hat eine faszinierende Novelle geschrieben: «Sich lichtende Nebel». Sie stellt uns zwei Personen vor, die über Quantenphysik nachdenken: einen Historiker und einen Physiker. Jede der einprägsamen Metaphern dieses Literaturwerks gestaltet eine essentielle Problematik zeitgenössischer Physik. Der Sprung von dieser anschaulichen Darstellung zu einer stärker formalisierten ist nicht so gross und ich versuche Sie als Leserin zu ermuntern, auch ein bisschen zu rechnen, so dass sie einem Unterricht über Quantenmechanik folgen könnten – und zugleich bei den phantastischen philosophischen Problemen, die die Quantenphysik stellt, mitdenken können.

Diese moderne Physik ist geprägt durch die Inschriften auf zwei Grabsteinen: dem von Ludwig Boltzmann und dem von Stephen Hawking. Sie starben mit gut hundert Jahren Abstand: 1906 und 2018. Die Tatsache, dass sie «ihre» berühmte Formel auf ihre Grabsteine meisseln liessen, sollte uns zu denken geben. Ich versuche den Ansatz von Haller zu erweitern und ihre Einsichten interessierten Laien einen Tick formaler zu erklären. Deshalb folgen nun drei Formeln!

1.1 $S = k \cdot \ln(W)$

Boltzmanns Definition von Information

Die Formel von Boltzmann kann man als Definition von Information lesen. Sie sagt, wie viele Bits man braucht, um eine grosse Informationsmenge zu beschreiben. Die Anzahl Bits wird Entropie genannt und mit S bezeichnet. Die grosse Informationsmenge wird mit W bezeichnet und ist die Zahl von verschiedenen Zuständen, die z.B. 1 Mio. Gasatome in einem Volumen von einem Liter einnehmen können. Die komische Funktion $\ln$ kann man vorerst vergessen. Sie bestimmt den Exponenten, wenn man z.B. eine Zahl wie 5761 als «Hochzahl» beschreiben würde: also $5761 = 10^{\text{wieviel}}$. In unserem Beispiel wäre



das «wieviel» eine Zahl zwischen 3 und 4¹. Das k ist die so genannte Boltzmann-Konstante. Auch sie ist eigentlich unwichtig. Sie dient dazu, die Einheiten auf der linken Seite der Gleichung mit denen auf der rechten Seite in Einklang zu bringen.

Die Leistung von Boltzmann

Die grosse Leistung von Boltzmann bestand nun darin, dass er diese eigentlich mathematische Grösse der Information mit der Physik in Verbindung brachte. Diese Verbindung wird zweiter Hauptsatz genannt und beschreibt, wie sich die Information oder Entropie verändert, wenn man eine kleine Energiemenge (dQ) in ein Gas hineinbringt: Z.B. indem man es aufheizt (dQ) oder zusammenpresst $p \cdot dV$. Diese letztere Grösse nennt man Arbeit. Sie entsteht durch die Veränderung des Volumens um dV :
 $T \cdot dS = dQ$ oder $= p \cdot dV$

Die kleine Entropieänderung dS mal die Temperatur T entspricht der Wärme-Energie, oder der Arbeits-Energie, die man an einem Gas leistet. Information ist also direkt mit Energie verknüpft.

Der Skandal

Boltzmann wurde ganz heftig angefeindet. Der Grund war, dass er durch die Grösse W einen atomaren Aufbau z.B. der Luft postulierte. Das W entsteht durch die verschiedenen Anordnungen der Luftmoleküle im Raum. Damit verband Boltzmann eine Grösse aus unserem Leben, die Temperatur, mit einer Grösse auf atomarem Niveau, der Anzahl Anordnungsweisen von Gasatomen. Boltzmann postulierte Atome lange bevor sie entdeckt waren! Er verband die Mikroskopie (Anordnung der Atome) mit der Makroskopie (Temperatur).

1.2 $S = 4\pi \cdot M^2$

Bekensteins Postulat von 1973

Stephan Hawking war ursprünglich kein Freund seiner berühmten Formel. Sie wurde 1973 von Jacob Bekenstein postuliert und erntete heftigen Widerspruch – auch von Hawking. Allerdings erkannte Hawking, dass er mit ihr seine Haupteinsicht, die Abstrahlung von Energie durch schwarze Löcher, besser begründen konnte. Es gelang ihm dann, die Bekensteinsche-Formel überzeugender herzuleiten.

Die Information ist beschränkt

Auf dem Grabstein von Hawking findet sich die Formel nicht in der von mir beschriebenen Form². Der Grund liegt an meinem Interesse für Information. Die Bekensteinsche Formel, oft auch Bekenstein-Grenze genannt, gibt in meiner Formulierung die

¹ Genau genommen: In ergibt das «Wieviel», wenn man 5761 als 2.72^{wieviel} schreiben will. Die sonderbare Zahl 2.72 heisst e und ihre Bedeutung in den Wissenschaften ist gross, weil man mit ihr Wachstum gut beschreiben kann.

² Auf seinem Grabstein steht: $S = \pi A k c^3 / 2hG$. A ist die Oberfläche eines schwarzen Loches. Deren Grösse ist verantwortlich für die Entropie innerhalb des schwarzen Loches. Durch den Radius des schwarzen Loches, den so genannten Schwarzschildradius $r = 2GM/c^2$, kann man die Oberfläche A mit $4\pi r^2$ ersetzen. In meiner Formulierung lasse ich die Einheiten weg, so dass man die Struktur der Formel besser sieht. (cf: Wikipedia, Bekenstein-Hawking-Entropie)



maximale Information an, die in einem schwarzen Loch vorhanden sein kann. Diese Information kann nicht grösser sein als 4π -mal die Masse dieses schwarzen Loches im Quadrat: Das heisst, die Information ist beschränkt! Diese Aussage ist wahrscheinlich ebenso wichtig wie die von Einstein und Maric:

$$E = mc^2$$

Wir leben in einem schwarzen Loch

Da wir in einem Universum leben, das die Dimensionen eines Schwarzen Loches hat, ist diese Aussage von enormer Bedeutung. Sie sagt nämlich, dass uns die Natur nicht beliebig viel Information liefert, wenn wir in immer kleinere Dimensionen vordringen.

Quantenmechanik: die Natur weigert sich, mehr Information zu liefern

Wenn wir winzige Räume beschreiben wollen, weigert sich die Natur, uns genügend Information zu liefern. Ab einer bestimmten Kleinheit sagt sie: «Basta». Dieses Basta kommt z.B. so daher, dass wir bei einem Teilchen nur noch wissen, ob es in einem bezeichneten Raumteil drin ist oder nicht. Die Natur weigert sich, anzugeben, wo das Teilchen in diesem Raumteil sich aufhält. Der Raum ist deshalb aufgeteilt in kleinste Einheiten, so genannte Quanten. Wir müssen nun ein Modell erstellen, um diese Weigerung zu beschreiben. Dieses Modell nennen wir Quantenmechanik oder im Falle des gequantelten Raumes Quantengravitation. Am Beginn der Quantenmechanik steht ein Naturgesetz: die Weigerung der Natur, unendlich viel Information zu liefern. Diese Weigerung wird mit der Bekenstein-Hawking Formel prinzipiell festgelegt.

1.3 $E = 1240 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / \lambda$

Wann kann man an Meereswellen erkennen, dass ein Schiff fährt?

Stellen wir uns vor, wir sitzen in einem Boot auf dem weiten Meer und Wellen schaukeln unser Gefährt. Wenn unser Schiff klein ist verglichen mit den Wellen, wird es durch sie angehoben und im Takt der Wellen schaukeln. Die Wellen laufen weiter und werden durch unser Schiffchen nicht gestört. Ist das Schiff aber ein Ozeandampfer, dann brechen sich die Wellen an seinem Rumpf und das Wellenmuster wird gestört. Diese Störung von Wellen verwenden wir in der Physik, um ein Objekt zu untersuchen. Wenn die Wellenlängen kürzer sind als das Objekt, werden sie gestört und wegen dieser Störung können wir das Objekt lokalisieren. Wie kurz müssen nun die Wellen sein, wenn man z.B. ein Proton «sichtbar» machen will, indem man es mit Elektronen beschiesst? Die Wellenlänge eines Materieteilchens, wie des Elektrons, berechnet sich nach der Formel von Maric und Einstein:

$$E = 1240 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / \lambda$$

Dabei ist λ die Wellenlänge und E ist die Energie des Elektrons. Wenn wir nun ein Proton sichtbar machen wollen, müssen wir die dafür nötige Energie des Elektrons bestimmen: Die Grösse eines Protons ist ungefähr 10^{-15} m oder ein so genanntes Fermi (fm). Wenn wir für $\lambda = 1 \text{ fm}$ einsetzen, kürzt sich das fm weg und die Energie des Elektrons wird 1240 MeV sein.



Beschleuniger als «Elektronenmikroskop»

Es ist nicht ganz einfach, ein Elektron auf 1'240 MeV zu beschleunigen. Man braucht dazu eine Spannung von 1'240 Millionen Volt. Sie beschleunigt die Ladung von 1e mit 1'240'000'000 Volt und damit entsteht zum Schluss eine Bewegungsenergie von 1240 Mega-Elektron-Volt, oder 1240 MeV³. Normalerweise ordnet man dazu viele geladene Metallplatten in einem grossen Stapel an. Sie haben alle in der Mitte ein Loch: Wenn das Elektron durch die Öffnung hindurchtritt, wird es von hinten abgestossen und von vorne angezogen. Damit erhöht sich seine Geschwindigkeit. Ordnet man den Stapel in einer Linie an, gibt dies schnell einen Beschleuniger von 1000 Metern Länge. Man nennt ihn Linac, linear accelerator. Am CERN in Genf werden die Elektronen im Kreis herumgeführt, dann kann man die Spannung der Platten sukzessive erhöhen und das Elektron x-mal durch den Kreis jagen.

Der Rand des Nebels: Heisenbergsche Unschärfe

Wenn nun die Energie des Elektrons so gross ist, wie die Masse des zu untersuchenden Körpers, wird beim Zusammenprall, z.B. des Elektrons mit dem Proton, derart viel Energie ins Proton hineingebracht, dass zusätzliche Teilchen entstehen können. Dies ist bei Längen von 1 fm beim Proton der Fall: da seine Masse, oder Energie, ca. 1000 MeV beträgt. Damit wird die Welle nicht gestreut, sondern es kommt zu einer Kernreaktion mit der Erzeugung neuer Teilchen. Die Distanz von ein fm ist eine natürliche Beobachtungsgrenze. Unterschreitet man sie, dann bleibt das zu untersuchende Teilchen nicht stabil, sondern löst sich auf.

Man kann diese Grenze etwas verschieben, wenn man bereit ist, Kompromisse einzugehen. Z.B. wenn man akzeptiert, über den Ort nicht so exakte Angaben zu machen. Dann kann man die Geschwindigkeit des Elektrons etwas grösser machen, als es die 1 fm Grenze erlaubt. Dieses Spiel mit Ungenauigkeiten wird «Heisenbergsche Unschärfe» genannt.

Unglücklich: Welle- Teilchen-Dualismus

Die Formel

$$E = 1240 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / \lambda$$

hat zwei dominante Grössen: die Energie **E** und die Wellenlänge λ . Die Energie verbinden wir normalerweise mit einem Teilchen. Wir stellen es uns als Kügelchen vor und denken, es fliege mit einer Geschwindigkeit daher. Bei der Wellenlänge denken wir an eine Welle, die durch den Abstand ihrer Wellenbuckel charakterisiert ist. Die Gleichung von Maric und Einstein verbindet nun ein Teilchen (mit Energie **E**) mit einer Welle (der Länge λ). Diese Verbindung war damals, 1905, ein revolutionärer Gedanke. Kleine Teilchen haben eine Doppelnatur: Sie können sowohl als Teilchen, wie auch als Welle beschrieben werden. Unglücklicherweise wird diese Doppelnatur „Welle-Teilchen-Dualismus“ genannt und viele

³ Diese Energie ist viel grösser als die Energie der Masse des Elektrons. Diese beträgt nur ½ MeV und kann vernachlässigt werden.



Studierende denken, dies sei ein Widerspruch⁴.

Atomares Einheiten-System

Einstein und Maric haben die oben zitiert Formel nicht in dieser Form geschrieben. In ihrer Notation lautet sie:

$$E = hc/\lambda$$

Dabei ist h die so genannte Planck'sche Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit. Dies ist aber für Lernende eine schwer verständliche Form, weil sie sich darunter nichts vorstellen können. In der von mir angegebenen Form kann man sofort eine Wellenlänge einsetzen und bekommt dann die entsprechende Energie. Z.B. besteht das Licht aus Wellen der Länge 400 – 1000 nm (blau - rot). Ein Nanometer (nm) ist eine Million-mal grösser als 1 fm. Wenn man also 1000 mal 1 Million (M, Mega) fm unter dem Bruchstrich einsetzt, dann kann man das 1 fm und das M kürzen und erhält 1240 eV/1000: also ca. 1.2 eV. Dies ist die Energie des (roten) Lichtteilchens, des Photons⁵.

Witzbolde, die meinen Unterricht auf dem Gymnasium besucht haben, werden nun vielleicht vorschlagen, Truttmann soll auf seinen Grabstein schreiben:

$$E = 1240 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / \lambda$$

Mit dieser Formulierung führt man eine Art «atomares Einheitensystem» ein. Die Längen sind die Grössen der Kerne: 1 fm (Fermi). Die Energien sind die von fliegenden Elektronen oder von Lichtteilchen: eV (Elektronvolt).

Didaktik ist mehr als universitären Stoff ausdünnen

Diese Art, eine Formel zu schreiben, zeigt, dass Didaktik mehr ist als einen Stoff, den man an der Universität gelernt hat, etwas auszudünnen. Ein Unterrichtsinhalt muss auf jedem Niveau des Lernens in Bilder und Formen gegossen werden, die die Lernenden mit ihrer Lebenserfahrung verbinden können. Das Buch von Haller leistet dies in einer hervorragenden Weise für interessierte Laien. Es stellt sich damit in eine Reihe bedeutender Physik-Vermittler wie Richard Feynman oder Stephen Weinberg. Im Folgenden will ich darstellen, wie ich die Bilder von Haller lese.

⁴ Einstein und Maric formulierten den Zusammenhang für *Licht*, das damals mehrheitlich als Welle verstanden wurde. Das dazugehörige Teilchen wurde dann Photon genannt. Erst ca. 20 Jahre später postulierte de Broglie den Zusammenhang umgekehrt auch für ein *Teilchen*, z.B. das Elektron. Die entsprechende Welle wurde Materiewelle genannt. Was Heisenberg im Hintergrund der Novelle von Haller so plagt, ist die Tatsache, dass man das Atommodell seines geschätzten Professors (Bohr) mit stehenden Materiewellen des Elektrons wunderbar erklären kann. Aber das Elektron kann sich nicht auf Kreisbahnen um das Elektron bewegen, weil seine Wellenlänge in der Grösse des Atoms selber liegt. Damit kann das Elektron nur innerhalb des Atoms sein oder ausserhalb. Die Natur sagt uns nicht, wo genau es sich innerhalb aufhält – deshalb ist die Idee, es bewege sich auf einer Kreisbahn, eigentlich unsinnig.

⁵ Versuchen Sie das Gleiche mit einem «blauen» Photon von 400 nm zu machen. Sie sollten ca. 3 eV bekommen. Blaue Photonen sind energiereicher als rote.



2 Die Metaphern von «Sich lichtende Nebel»

2.1 Die Strassenlampen-Metapher

Heisenberg stellt beunruhigende Fragen an die exakte Wissenschaft der Physik

Ganz zu Beginn der Novelle lässt Haller seine beiden Protagonisten sich unerkantet begegnen. Heisenberg sitzt hinter dem Physikinstitut auf einer Bank, um sich von den anstrengenden Diskussionen mit seinem Mentor Bohr etwas zu erholen. Helstedt eilt von einem nächtlichen Treffen mit seinem schwierigen Freund Sörensen nach Hause. Er durchquert den Park hinter dem Physikinstitut auf einem dunklen Gehweg, der stellenweise erleuchtet wird von einer Reihe von Strassenlampen. Immer wenn der Historiker in den Lichtkegel einer dieser Lampen tritt, wird seine dunkle Gestalt für den Physiker kurz sichtbar. Danach verschwindet sie wieder in der Nacht, um bei der nächsten Lampe erneut aufzutauchen. Diese alltägliche Begebenheit erlangt im vorbereiteten Geist von Heisenberg eine veränderte Bedeutung. Da er mit seiner «Unschärfe-Relation» kämpft, erweitert sich die Szene um neue Sinnenebenen: Weigert sich die Natur an bestimmten Stellen, sich uns zu erkennen zu geben? Ist der nächtliche Wanderer noch da, auch wenn ich als Beobachter ihn nicht wahrnehme? Wenn ich «mit Gewalt» den Eilenden im Dunkel dingfest machen will, muss ich dann in die Natur eingreifen, indem ich z.B. mit einer Taschenlampe ihn anleuchte? Kann ich sein erneutes Erscheinen voraussagen? Wenn ja, muss ich dann Wahrscheinlichkeiten in die strenge Wissenschaft der Physik einführen? Welche Konsequenzen haben Wahrscheinlichkeitsaussagen für die Beschreibung der Welt? Können wir dann noch behaupten, wir hätten bei der Physik eine «exakte Wissenschaft»? Geben wir dann nicht dem Schwätzer recht, der lamentiert: «Alles ist relativ»?

2.2 Die Einzelfall-Metapher

«Wissenschaft» beschäftigt sich normalerweise mit Durchschnitten

Der Geschichtsprofessor Helstedt ist sich gewohnt, als Historiker Aussagen zu generellen Tendenzen zu machen. Er spricht von Mittelwerten, wenn er z.B. in seinem Fachgebiet zum Übergang von der Aufklärung zur Romantik publiziert. Nun erschüttert eine starke persönliche Erfahrung sein Leben: Er verliert seine geliebte Frau und stellt ein Interesse für eine Unbekannte fest. Diese persönliche Betroffenheit regt ihn an, von sich selbst zu schreiben. Er macht eine so genannte Einzelfallanalyse, indem er von einem einzelnen Menschen spricht, statt von einem Durchschnitt über viele Personen. Bei seiner Darstellung der eigenen Gedanken befürchtet er, sie nicht gut auf Papier bringen zu können oder sie gar zu zerstören, indem er sie zu beschreiben sucht.



Der Teufel liegt im Detail

Dieses Problem der Einzelfall-Analyse ist typisch für die Erkenntnis-Schwierigkeiten der Quantenmechanik. Die Natur weigert sich im Einzelfall – bei einem einzelnen Elektron, das auf ein Proton trifft – eine genaue Information zu liefern. Durchschnittswerte über viele solche Zusammenstösse stellen kein Problem dar.

Entanglement im Doppelspalt-Experiment

Die Informationsverweigerung der Natur wird oft mit einem so genannten Doppelspalt-Experiment illustriert: Man denke sich zwei enge Spalte, die nahe beieinander liegen. Lässt man Elektronen durch einen solchen Doppelspalt treten, so beobachtet man dahinter ein Beugungsmuster: ähnlich wie an der Kaimauer eines Hafens, in den Meereswellen durch eine Einfahrt eindringen. Das Wellenmuster findet sich auf allen Kaimauern, nicht nur in unmittelbarer Verlängerung der Hafeneinfahrt. Dieses Phänomen nennt man Beugung.

Die Weigerung der Natur besteht nun darin, dass sie uns bei einem einzelnen Elektron nicht sagt, durch welchen Spalt es hindurchgetreten ist. Würden wir durch eine raffinierte Apparatur messen, welches Loch ein Elektron tatsächlich passiert, dann würde das Beugungsmuster verschwinden! Man sagt, der Durchtritt durch den einen Spalt sei mit einem möglichen Durchtritt durch den anderen Spalt verbunden, entangeled. Diese Zweideutigkeit, das Entanglement, ist eine Folge der Informationsverweigerung. Sie aufzulösen verändert das System.

2.3 Die Beobachter-Metapher

Werden physikalische Aussagen vom Beobachter abhängig?

Die klassischen Naturwissenschaften sind stolz, so genannt objektiv zu sein. Ihre Resultate sind angeblich unabhängig von der beobachtenden Wissenschaftlerin⁶. Bei ganz kleinen Dimensionen ist diese Beobachterunabhängigkeit in Frage gestellt. Das merkt der «Bobachter» Heisenberg. Seine Beunruhigung deswegen ist gross und sein Heuschnupfen könnten auch daher stammen. Ist die schwarze Gestalt unter der Strassenlampe nur deshalb da, weil ich sie beobachte? Und wo ist sie, wenn ich sie nicht beobachte? Existiert sie dann womöglich gar nicht?

Heisenberg muss sich vom Schock erholen

Heisenberg bewegt sich als hervorragender Physiker auf der Höhe seiner Zeit. Er weiss, dass auch an einer weiteren Stelle diese Beobachterabhängigkeit den Physikerinnen und Physikern zusetzt: in der Relativitätstheorie. Die Konzepte von Einstein sind zur Zeit der Begegnung im Park noch stark umstritten. Wird diese philosophische Diskussion nun auch die Atomphysik durcheinander rütteln? Haller verdichtet die Beunruhigung von Heisenberg zu einer körperlichen Störung, einem Heuschnupfen, von dem er sich

⁶ Darin liegt ein Teil der Arroganz von Naturwissenschaften gegenüber Sozial- und Geisteswissenschaften, deren Resultate wesentlich vom Beobachter abhängig sind oder gar die Reaktion auf den Beobachter als Gegenstand ihrer Wissenschaft aufweisen.



in der «Natur», auf Helgoland, erholen muss. Haller spricht nur vom Beobachter, wenn er Heisenberg darstellt.

2.4 Die Spur-Metapher

Die Spur in der Nebelkammer visualisiert die Bahn eines Elektrons

Eine Nebelkammer besteht aus Wasserdampf unter hohem Druck. Wenn man mit einem Kolben diesen Dampfdruck schnell senkt, wird der Wasserdampf übersättigt und es können Tröpfchen entstehen. Sie ähneln den Tröpfchen der Kondensationsstreifen am Himmel. Wenn zuvor ein Elektron durch diesen gesättigten Dampf flog, kann es sein, dass eine Spur von Tröpfchen entsteht, weil das Elektron auf seinem Weg einigen Atomen ein Elektron wegschlug, sie dabei ionisierte und diese Ionen dann Wassermoleküle um sich sammelten. Damit kann der Weg eines Elektrons visuell dargestellt werden. Diese Spur widerspricht aber vorerst der Erkenntnis von Bohr und Heisenberg, dass Elektronen in einem Atom sich nicht auf einer Bahn um den Kern bewegen können.

Ein Schlauch statt einer nadelfeinen Spur

Der Durchmesser einer solchen Spur in der Nebelkammer ist aber viel, viel grösser als ein einzelnes Atom – in dem gemäss Heisenberg und Bohr die Atome nicht auf Bahnen kreisen können. Das heisst, das Elektron kann noch immer als kleines Wölklein aufgefasst werden, das durch den Raum fliegt und nicht als nadelfeiner Streifen. Genau genommen liegen also die Ionisationskeime nicht auf einer haarfeinen Spur, sondern bilden eher eine Art Schlauch.

Wellenpakete: zu einer Hauptwelle Nebenwellen addieren

Diese Wölklein heissen in der Fachsprache Wellenpakete. Wenn man ein Elektron mit einer Welle mit z.B. der Wellenlänge von 1 fm beschreibt, dann weiss man nicht, wo das Elektron sich befindet. Eine Welle erstreckt sich ja prinzipiell von minus Unendlich bis plus Unendlich. Nun gibt es ein mathematisches Verfahren, dass die Welle zu einem Wölklein macht und damit eine Lokalisation des Elektrons zulässt: Man addiert zur Hauptwelle von 1 fm noch Wellen dazu, deren Wellenlängen sich nur geringfügig (um bis zu $\Delta\lambda$) von der Hauptwelle unterscheiden. Man macht dies mit einigen Wellen, deren Höhen kleiner sind als die der Hauptwelle. Die Wellenlängen sind dann um 1 fm konzentriert.

Ort des Elektrons wird lokalisierbar

Hält man die Welle fest, so dass sie nicht laufen kann, z.B. so dass die Hauptwelle einen Buckel bei $x=0$ hat, dann entsteht ein höherer Buckel, weil bei $x=0$ auch die Nebenwellen Buckel haben. Etwas entfernt von diesem Hauptbuckel sind die Buckel und Täler der addierten Wellen aber etwas verschoben, so dass dort die Täler auf die Buckel fallen und so die Hauptwelle kompensieren. Damit entsteht um den Ort $x=0$ ein Wellenpaket mit der Breite Δx .



Das Verhältnis der Ungenauigkeiten ist fest

Die grosse Leistung von Heisenberg bestand nun darin, dass er eine Formel für das Verhältnis von $\Delta x / \Delta \lambda$ angeben konnte. Dieses Verhältnis ist immer fest. Wenn man Δx verkleinern will, weil man den Ort des Elektrons genauer bestimmen will, dann muss auch $\Delta \lambda$ abnehmen. Da die Energie oder die Geschwindigkeit des Elektrons mit λ auch abnimmt (Formel 1.3) heisst das, dass dann die Energie des Elektrons ungenauer angegeben werden kann.

Mensch hat keine Sinnesorgane für Quanten

2.5 Die gläserne Welt-Metapher

Wir Menschen haben keine Sinnesorgane, die es erlauben würden, Ereignisse auf dem Grössenniveau von Quanten wahrzunehmen. Deshalb ist es für uns auch sehr schwierig, Modelle in diesen Naturbereichen zu entwickeln. Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler flüchten daher zu Modellen der Mathematik. Die sind für viele Studierende schwer verständlich und eine grosse Hürde. Der Geisteswissenschaftler Helstedt dagegen darf sich etwas mehr kreative Freiheit herausnehmen. Der Autor legt ihm ein anschauliches Modell im Sinne einer veränderten Wahrnehmung ins Hirn. Im Laufe des Buches wird diese «Quantenwahrnehmung» allmählich konkreter und mit den Einsichten der Quantenmechanik angereichert.

Augen können beinahe einzelne Photonen erkennen

Es gibt allerdings ein Sinnesorgan, bei dem wir die Quantenwelt beinahe erreichen: die Augen. Unsere Netzhaut reagiert, wenn 3-5 Photonen auf sie treffen. Deshalb dehnt Haller die Empfindlichkeit bei seinem fiktiven Historiker etwas aus, so dass er plötzlich einzelne Photonen sehen kann. In diesem ausserordentlichen Wahrnehmungszustand sah Helstedt «Strahlen» und «Energiebündel», die allerdings wie ein «Starkregen» daherkamen. Dies verstehe ich als die Wahrnehmung einzelner Photonen. Unser Auge würde in einem solchen Falle nicht kontinuierlich sehen, sondern mit: Tick, Tick-Tick, Tick-Tick-Tick, Tick, Tick-Tick... usw. Wenn die Lichtintensität ganz gering ist, nähmen wir einzelne Photonen wahr. Und wir Sehenden wären mit dem Photon verbunden, entangled. Diesen Gedanken will ich noch etwas ausführen:

Die Linse des Auges als Glasplatte

Wir denken uns die Linse des Auges aus Glas und wissen, das Glas Licht mehrheitlich durchlässt, aber auch zu einem geringen Teil zurückwirft. Damit wird die Linse unseres Auges in das System der Photonen eingebunden. Ein Photon, das auf eine solche «Glasscheibe» zufliegt, habe ich in meinem Buch zur künstlichen Intelligenz beschrieben. Ich zitiere daraus:

Das Photon «weiss nicht», ob es eine Glasplatte durchdringen wird oder von ihr zurückspringt

Stellen wir uns als Beispiel ein Wohnzimmer vor, das von einer Terrasse umgeben ist und von dem aus wir durch ein Fenster in die Natur schauen können. Betrachten wir das Blatt eines Baumes: Sein grünes Licht dringt durch das Fenster in unser Auge. Wenn wir auf der Terrasse stehen würden, dann könnten wir den Baum eventuell auch schwach reflektiert in der Scheibe erblicken. Das ist der springende Punkt: Das grüne Licht kann durch die Scheibe hindurchtreten, oder es kann von der Scheibe zurückspringen. Viele



Leute denken: Das Licht besteht aus Wellen und ein Teil der Wellen dringt durch die Scheibe und ein anderer Teil wird reflektiert. Basta. Nun wissen wir seit der bahnbrechenden Arbeit von Mileva und Albert Einstein aus dem Jahre 1905, dass Licht aus Teilchen besteht. Wenn nun ein solches grünes Lichtteilchen vom Blatt auf das Fenster zufliegt, wie weiss es dann, ob es zurückspringen soll oder nicht?

Es weiss es nicht!

Die Natur gibt uns keine Auskunft über ein einzelnes Teilchen. Sie gibt uns nur eine Aussage, was passiert, wenn sehr viele Teilchen auf die Scheibe zufliegen: Dann gehen im Maximalfall 84 % durch und 16 % kommen zurück.

Auf Quantenniveau ist das Auge des Beobachters mit der Natur verwoben – und nicht unabhängig

Für ein einzelnes Photon ist das Glas, oder eben die Linse unseres Auges, mit dem Photon entangled: Der Zustand, «Photon tritt durch» und der Zustand «Photon wird reflektiert» sind miteinander verwoben, weil die Natur nicht mehr so viel Information liefert, dass das einzelne Photon schon zum Voraus weiss, ob es durchtreten oder zurückspringen wird. Das Auge des Menschen ist beim einzelnen Photon Teil der Quantenwelt. Wenn das Auge aber von vielen Photonen getroffen wird – was der Normalfall ist – dann geht die Quantenwelt in die normale Welt über. In Hallers Bild ist dieser Normalfall der Starkregen.

Kanten und Oberflächen verschwimmen

Unsere Augen sind also nah an der Quantenwelt dran und könnten leicht vom kontinuierlichen Sehen in das abgehackte Sehen übergehen. Die Ortsauflösung der Augen jedoch ist meilenweit von einer Quantenwelt entfernt. Sichtbares Licht kann Atome oder Atomverbindungen nicht auflösen. Das Atom ist ein zu kleines Schiff, als dass die Lichtwellen sich an ihm stören würden. Im veränderten Wahrnehmungszustand hebt Haller auch diese Beschränkung auf. Helstedt kann zwar die Ränder von Objekten noch sehen, aber sie sind seltsam verschwommen. Dies ist eine Folge der Heisenbergeschen Unschärfe, weil das Licht als Wellenpaket immer eine Ortsunschärfe der Grösse Δx mit sich trägt und deshalb eine Kante nicht scharf abbilden kann.

Der veränderte Wahrnehmungszustand von Helstedt weist noch weitere Merkwürdigkeiten auf, die einerseits die physikalische Kompetenz des Autors manifestieren und andererseits seine Fähigkeit, den Leser in ein schwieriges Gebiet einzuführen.

2.6 Die „Überall-sind-Lösungen“-Metapher

Schrödingers Katze oder die Mehrwelten-Theorie

Helstedt hat einen Freund, Sörensen, der ihm mächtig auf den Wecker geht. Dieser behauptet, alles was man auf der Welt vorfinde, sei die Lösung eines Problems. Diesen schwierigen Freund identifiziere ich mit den «Mehr-Welten»-Theoretikern. Sie behaupten, beim Durchtritt durch einen Doppelspalt würden zwei unterschiedliche Welten entstehen, je nachdem, ob das Elektron durch Spalt 1 oder Spalt 2 durchtreten würde. Die Welt würde sich an dieser Stelle in einer Art verzweigen. Plakativ illustriert diese



Aufspaltung in zwei Welten der Physiker Erwin Schrödinger mit seiner Metapher der schwarzen Katze. Sie lebe in einem schwarzen Kasten, in den man von aussen keine Einsicht hat. Im Kasten befindet sich auch noch ein raffinierter Mechanismus, der eine Giftkapsel zum Bersten bringen kann. Bildlich gesprochen trifft dies zu, wenn ein Elektron durch den Spalt 1 tritt und die Ampulle springt nicht, wenn das Elektron durch Spalt 2 geht. Wenn nun ein Beobachter diese Kiste anschaut, kann er sich fragen, ob die Katze noch lebt. Etwas ironisch nimmt Schrödinger die Quantenmechanik mit diesem Beispiel auf den Arm, indem er postuliert, die Quantenmechaniker müssten nun einen verschränkten Zustand erfinden, der eine tote Katze mit einer lebenden überlagert. Die Mehrwelten-Theoretiker lösen das Dilemma, indem sie zwei Welten definieren: eine mit einer toten Katze und eine mit einer lebenden. Das Ärgernis besteht darin, dass man den Zustand der Katze nur kennen kann, wenn man die Kiste öffnet.

Bei der Beobachtung auf Quantenebene muss der Beobachter eingreifen

Schrödinger kritisiert, dass nach der Theorie der QM der Beobachter in die Welt eingreift: Die Welt verlaufe anders, wenn der Beobachter beobachtet als dann, wenn er nicht beobachtet. Ich finde diesen Einwand nicht stichhaltig. Die Welt wird durch den Beobachter nur dann verändert, wenn er die Natur zur Informationsweitergabe *zwingen* will. Dann ändert er den Lauf der Welt. Das ist aber meiner Meinung nach kein Problem, wenn man einmal akzeptiert hat, dass die Natur nicht unendlich viel Information liefert.



3 Die Kopenhagener Deutung

3.1 „Gott würfelt nicht“

Die Weigerung der Natur führt zu Wahrscheinlichkeitsaussagen

Für viele Physikerinnen und Physiker ist der Gedanke schwer zu ertragen, dass sich die Natur ab einem bestimmten Punkt weigert, mehr Information zu liefern. Er bedeutet z.B. bei einem Elektron, das auf einen so genannten Doppelspalt zufliegt, dass die Natur sich weigert, zu sagen, welchen Spalt es passieren wird. Es entsteht eine Art Doppeldeutigkeit, weil die Information, «es wird hindurchtreten», weniger gross ist, als die Aussage, «es wird durch den Spalt eins» hindurchtreten. Der Durchtritt durch den Spalt bleibt in einer Art in der Schwebe und ein möglicher Durchtritt durch Spalt 1 muss mit einem Durchtritt durch Spalt 2 mit einem «gemischten» Zustand beschrieben werden. Diese Nicht-Eindeutigkeit nennen wir wie gesagt Entanglement. Bei *sehr vielen* Elektronen, z.B. 1000, wird die Aussage aber eindeutig: Ca. 500 treten durch Spalt 1 und ca. 500 treten durch Spalt zwei⁷. Für *ein einzelnes* Elektron reduziert sich diese sichere Aussage auf eine blosser Wahrscheinlichkeitsangabe. Bei einem einzelnen Teilchen, einem Elektron oder Photon usw., lässt sich die Zweideutigkeit nicht aufheben – die Physiker sind gezwungen, von Wahrscheinlichkeiten zu reden. Bei sehr vielen Quanten-Prozessen verwandelt sich die abnormale Quantenwelt aber in die normale Welt.

Albert Einsteins verwarf die QM Zeit seines Lebens

Albert Einstein hat dieses Ärgernis in den plakativen Satz gegossen: «Gott würfelt nicht». Beim Werfen eines Würfels können wir sein Resultat nur mit einer Wahrscheinlichkeit voraussagen. Zeit seines Lebens hat er nach einem verborgenen Mechanismus gesucht, der den zufälligen Ausgang vorhersagen könnte. Bei einem Würfel ist dies prinzipiell möglich, wenn man mit mühsamer Präzision angeben würde, wie er genau geworfen wird. Bei einem Elektron vor einem Doppelspalt ist diese Mühe vergebens. Die Natur weigert sich: Weil die Informationsmenge in einem endlichen Raum begrenzt ist! Deshalb ist die Bekenstein-Hawking-Formel so wichtig und wird auch Bekenstein-Grenze genannt.

3.2 Physiker sind oft naive Realisten

Vielen Menschen ist nicht klar, dass das, was in unserem Kopf vorgeht, nicht das ist, was sich in der Welt da draussen vorfindet und abspielt. Wir machen in unserem Kopf ein Bild von der Welt. Dann leben wir, als ob die Welt wäre, wie wir sie im Kopfe konstruiert haben. Metzinger spricht von diesem «Als-Ob» und nennt dann die Menschen, die zwischen Realität und Bild von der Realität nicht unterscheiden können, naive Realisten.

⁷ Das Ca. wird Sie vielleicht auch wieder stören. Wir können es aber angeben: Ca. heisst plus oder minus Wurzel aus 250, also: 500 +/- 16. Je höher die Zahl der Elektronen wird, desto kleiner wird dieses Ca. Für Spezialistinnen: Sigma ist die Wurzel aus $n \cdot p \cdot q$, da $p=q=1/2$ ist, entspricht dies der Wurzel aus der Zählrate ($n \cdot p$) geteilt durch 2. Das ist der kleinste Fall eines Sigmas. Meine Schülerinnen und Schüler lernten als Faustregel: Sigma gleich Wurzel aus der Zählrate.



Einstein und auch der oben genannte Erwin Schrödinger gehören zu dieser Kategorie naiver Realisten. Erwin Schrödinger kommt im Rahmen der Quantenmechanik ein grosses Verdienst zu: Er war Spezialist in der Beschreibung von Wellen. Heisenberg, Bohr und andere nahmen nun die Schrödingerschen Wellen und deuteten sie um. Dies nennt man Kopenhagener Deutung und sie verursachte mindestens 100 Jahre lang erheblichen Ärger.

3.3 Die Kopenhagener Deutung

Der oben erwähnte Richard Feynman wurde eingeladen, vor den Mitgliedern eines amerikanischen Frauenvereins seine Quanten-Elektro-Dynamik (QED) zu erklären. Er nahm den Challenge an und daraus entstand eine didaktische Perle von Wissensvermittlung⁸.

«Wie zählen wir die Bohnen?» Mit einem rotierenden Pfeil.

Feynman sagte, wenn wir ein Naturgesetz entdecken, dann müssen wir ein Modell entwickeln, um die «Bohnen zu zählen». Die Bohnen sind im Falle des Doppelspalts die Anzahl der Elektronen, die man hinter dem Spalt an einer bestimmten Stelle findet. Man denkt sich, man bewege sich auf einer Parallele zur Ebene der Spalten und spricht auch oft vom Schirm. In der so genannten Kopenhagener Deutung haben Bohr und andere die Wellen von Schrödinger anders interpretiert, um die Elektronenverteilung auf diesem Schirm vorherzusagen. Feynman beschreibt diese Deutung mit einem rotierenden Pfeil. Er sagt, man soll sich einen rasch drehenden Pfeil vorstellen, der jedem Elektron bei dessen Produktion mitgegeben wird. Der Pfeil müsse schnell rotieren, so dass er sich einmal dreht, wenn die Materiewelle des Elektrons einen Buckel und ein Tal erzeugt hat. In der Fachsprache nennt man diese Zeit die Periodendauer.

Entanglement: Pfeile addieren

Hinter dem Spalt wird der Pfeil des Elektrons durch den oberen Spalt an den Pfeil des Elektrons durch den unteren Spalt angehängt. Wenn man hinter dem Doppelspalt genau in der Mitte zwischen den Spalten steht, werden beide Elektronen gleich lange geflogen sein und die Pfeile sind parallel. Der Summenpfeil wird doppelt so gross sein.

Wenn man sich nach oben, in Richtung des ersten Spaltes, bewegt, wird das «obere» Elektron einen kürzeren Weg haben und sein Pfeil wird weniger lang gedreht haben: Die Pfeiladdition ergibt ein Dreieck; der Summenpfeil wird kürzer. An einer bestimmten Stelle wird der «untere» Pfeil um 180 ° mehr gedreht haben, weil sein Weg länger war und die Pfeile werden antiparallel sein und sich aufheben.

Wahrscheinlichkeit: Summenpfeil quadrieren

Nun muss man nur noch den Summenpfeil quadrieren und man bekommt die Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit gibt an, ob man hinter dem Doppelspalt an einer gewissen Stelle auf dem

⁸ Feynman Richard P.: «QED. Die Seltsame Theorie des Lichts und der Materie.» Piper 1988.



Schirm Elektronen findet oder nicht. Diese Wahrscheinlichkeit schwankt zwischen einem Maximalwert bis zu Null. Dies ergibt das Beugungsmuster, wie es die Benetzung einer Kaimauer auch zeigt⁹.

3.4 Ein Formalismus als Nebelmeer

**Quantenmechanik sei
erstaunlich genau und
unnötig kompliziert**

Der Formalismus der Quantenmechanik gilt einerseits als die genaueste Theorie der Physik und andererseits als unnötig kompliziert¹⁰. Haller spricht von einem Nebelmeer, auf das man von einer hell besonnten Bergspitze schaut. Unter dem Meer findet sich ein Wabbeln und Wühlen. Darüber ist alles klar und einfach. Der Mechanismus von Pfeilen, die prinzipiell unendlich lange drehen können, die addiert und am Schluss quadriert werden, spuckt eine einzige Zahl aus: die Wahrscheinlichkeit. Dieser Formalismus gleicht einem Nebelmeer. Die Pfeile sind Funktionen, die von minus Unendlich bis plus Unendlich sich erstrecken. Sie enthalten unendlich viel Information. Zum Schlusse werden sie zerschlagen und auf eine simple Zahl reduziert. Sie alleine kann beobachtet und gemessen werden.

**Bedeutungshorizonte
verschmelzen**

«Sich lichtende Nebel» verbindet auf eindruckliche Weise verschiedene Bedeutungshorizonte: Die Beobachtung lichtet den Nebel, sie löst ihn nicht auf. Das Ringen der beiden Protagonisten versucht den Nebel zu durchdringen. Das Resultat bleibt aber auf eine intrinsische Art nebulös, weil uns die Natur nicht mehr Information liefert. Denken findet oft im Nebel des Unbewussten statt. Es zu benennen vertreibt zwar den Nebel, aber auch viele Bezüge und Assoziationen. Diese Bedeutungsebenen zu finden ist die Aufgabe von Geisteswissenschaften. Hallers Novelle überzeugt in einer weiteren Hinsicht: Sie versöhnt Geistes- und Naturwissenschaften.

⁹ Im Anhang zu meinem Buch 'Künstliche Künstler' habe ich die Feynmanschen Ideen im Kapitel 10.1.2 in Formeln umgeschrieben: auffindbar unter www.luzernleadership.ch/#downloads, Text: Mathem. physikalischer Hintergrund von KI. Damit wird auch formal der Anschluss an die Quantenmechanik ermöglicht.

¹⁰ Feynman sagt, ihre Genauigkeit erlaube es, die Distanz zwischen Los Angeles und Chicago auf einen Millimeter genau zu bestimmen.



4 Das Spannungsfeld von Denken und Sprache

4.1 Tiefschürfende Fragen

Vermittlung erfordert einen gemeinsamen Horizont

Haller stellt in seiner Novelle meiner Meinung nach tiefschürfende Fragen. Mit seiner Metapher der gläsernen Welt, die eine veränderte Wahrnehmung imaginiert, lässt er Helstedt fragen, ob die eigenen Gedanken mehr sind, als das, was man mit einem Schriftzug auf einem Blatt Papier oder einer sprachlichen Tonspur zum Ausdruck bringen kann. Selbst die eigenen Gedanken sind oft mehr, als man «sagen» kann. Ganz zu schweigen von der Vermittlung dieser Gedanken an einen anderen Menschen. Wenn ein Gesprächspartner nahesteht, kann dies gelingen. Weil man mit diesem Menschen viele Wahrnehmungen teilt. Deshalb glaubt er, die gläserne Welt seiner gestorbenen, langjährigen Partnerin erklären zu können, nicht aber der Unbekannten, die er zufällig getroffen hat. Die Schriftzüge auf seinen Blättern, mit denen er seinen veränderten Wahrnehmungszustand beschreiben will, lassen auf eine tiefere Ebene der Bedeutung blicken. Allerdings nur, wenn der eigene Erfahrungshorizont sich mit dem des Schreibenden verschmelzen lässt.

Auch durch die Formeln und Berechnungen von Heisenberg kann man auf eine tiefere Ebene der Bedeutung blicken. Auch diese Sprache erfordert einen gemeinsamen Horizont, so dass sie Mittel zur Kommunikation werden kann. Leider verfügen nur wenige Menschen über diese Sprache.

Ein Wort suchen: der Gedanke ist da, aber die Sprache nicht

Dass Denken mehr ist, als man mit Sprache formulieren kann, erlebt man oft, wenn man nach einem Wort sucht: Der Gedanke ist da, aber das Wort fehlt. Eindrücklich tritt dieses Dilemma bei Namen zu Tage. Man hat die Person deutlich vor sich, man kann sie beschreiben, aber der Name kommt nicht. Wenn er dann einfällt, stellt sich eine Art Erleichterung ein. Die Kommunikation klappt. Aber geht auch etwas verloren?

Neue Phänomene erfordern eine neue Sprache

Damit schliesst sich der Kreis zu den Quantenphänomenen. Sie sind unserer Wahrnehmung nicht zugänglich. Die Vertrautheit mit ihnen fehlt uns. Deshalb ist das Reden über sie so schwierig. Diese Schwierigkeit stellt aber nicht in Abrede, dass sie existieren – auch ohne uns. Und das heisst auch nicht, dass wir stumm bleiben müssen in ihrem Angesichte. Wir werden eine Sprache finden und entwickeln, um sie zu fassen. Diese Sprache beruht auf Gegenseitigkeit. Die Adressatin muss mindestens zu einem Teil die Wahrnehmungen des Senders teilen. Dadurch entsteht Kommunikation. Zu ihr tragen Versuche, wie Hallers Novelle erheblich bei.

