

Leitfaden zur Quantentheorie

Helmut Kinder, Cornelia Schmieg und Johannes Schmieg

Einleitung

Die biologische Evolution hat uns die Vorstellung mitgegeben, dass jedes Ding seinen Ort hat. Diese Vorstellung war einfach und sicherte unser Überleben. Erste Mathematiker (Euclid) und Physiker (Newton) präzisierten diese Vorstellung, die auch Kant als „a priori“ vorgegeben betrachtete. Doch hat sich gezeigt, dass in der neuzeitlichen Mikrophysik, der Quantentheorie, diese Vorstellung modifiziert werden muss: die Quantentheorie ist „nichtlokal“.

Mikroteilchen haben keinen ganz bestimmten, festen Ort. Und wenn sie sich im Raum bewegen, haben sie auch keine ganz bestimmte Geschwindigkeit. Doch sind Ort und Geschwindigkeit auch nicht völlig unbestimmt, sondern es gibt für jedes Teilchen einen bestimmten Ortsbereich, in dem es sich aufhält und einen gewissen Bereich an Geschwindigkeiten, den es einnimmt. Auch wenn dies sehr schwer vorstellbar ist, so ist es doch seit fast einem Jahrhundert experimentell ganz klar erwiesen. Nur so erklärt sich die Stabilität von Atomen, die chemische Bindung, die elektrische Leitfähigkeit der Metalle und Halbleiter und die Erzeugung von Licht durch LEDs. Die Bereiche von Ort und Impuls der Mikroteilchen lassen sich präzise berechnen mit Hilfe der sog. Schrödingergleichung.

Aus dieser Schrödingergleichung lassen sich zwei einfache Regeln ableiten: die Unschärferelation von Werner Heisenberg sowie die Beziehung zwischen Impuls und Wellenlänge von Louis de Broglie. Allein diese beiden Regeln sollen in der vorliegenden Schrift verwendet werden, um ein Verständnis für die „geheimnisvollen“ Phänomene der Quantentheorie zu gewinnen, ohne deren mathematischen Apparat. Dabei empfehlen wir dem Leser, zunächst nur den Text zu lesen, der ganz frei von Formeln ist. Anschließend sind dann für ein weiterführendes Interesse die betreffenden Formeln in den Kästen zu finden.

Heisenbergs Unschärferelation

Heisenberg hat als Erster erkannt, dass die Unbestimmtheiten des Ortes und der Geschwindigkeit eines Mikroteilchens nicht ganz beliebig sind, sondern dass sie einer Regel folgen, der nach ihm benannten Unbestimmtheits- oder Unschärferelation, die später durch die Schrödingergleichung bestätigt wurde. Die Regel besagt, dass die gemeinsame Unbestimmtheit von Ort und Geschwindigkeit, also das Produkt aus beiden Unbestimmtheiten, nicht beliebig klein sein kann. Wenn also der Ort sehr genau festgelegt ist, ist die Geschwindigkeit besonders unbestimmt, und wenn die Geschwindigkeit sehr genau festgelegt ist, ist der Ort entsprechend unbestimmt.

In einfachster Form lautet die Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

Dabei ist $p = m \cdot v$ der Impuls eines Teilchens mit der Masse m und der Geschwindigkeit v . Entsprechend sind $\Delta p = m \cdot \Delta v$ und Δx die „Unbestimmtheiten“ von Impuls und Ort, also grob gesprochen der Bereich, auf den sich die jeweilige Größe im Wesentlichen verteilt, und h ist die Plancksche Konstante. Da letztere sehr klein ist, spielt die Relation in der Makrowelt keine Rolle.

De Broglie Beziehung

Wenn wir einen Fahrradreifen aufpumpen, sehen wir, dass er auf Druck kommt. Tatsächlich aber prasseln ständig die Moleküle der Luft auf seine Innenwand, und zwar so schnell,

dass wir den Aufprall jedes einzelnen Moleküls nicht wahrnehmen, sondern nur die Gesamtwirkung, eine gleichmäßige Kraft auf die Innenwand. Diese Kraftwirkung der Teilchen wird umso größer, je massiver und schneller sie sind. Es kommt also auf das Produkt von Masse und Geschwindigkeit an, den sog. „Impuls“ der Teilchen.

Auch wenn man Licht in einem Spiegelkasten einsperrt, übt dieses einen messbaren Druck auf die Spiegelwände aus, den sog. Strahlungsdruck. Beispielsweise bläst die Sonne per Strahlungsdruck die Kometenschweife nach hinten. In dieser Hinsicht verhält sich das Licht nicht anders als die Teilchen der Luft. Also kann man auch dem Licht einen Impuls zuschreiben. Der Strahlungsdruck, und damit der Impuls, wird umso größer, je härter die Strahlung ist, also je kürzer die Wellenlänge. Impuls und Wellenlänge sind also umgekehrt proportional zueinander.

Dies alles war schon in der klassischen Physik bekannt.

Als dann Einstein 1905 den sog. Photoeffekt dadurch erklärte, dass das Licht tatsächlich aus einzelnen Teilchen besteht, die jeweils ein Plancksches Energiequantum enthalten, ergab sich daraus auch der Proportionalitätsfaktor zwischen Impuls und Wellenlänge, die Plancksche Konstante h .

Später wurde dann klar, dass nicht nur Lichtwellen Teilcheneigenschaften hatten, sondern umgekehrt auch Teilchen, z. B. Elektronen, Welleneigenschaften zeigten, sog. Interferenzen. Daher forderte erstmals Louis de Broglie, dass derselbe Zusammenhang wie beim Licht auch für Teilchen gelten müsse, wobei jetzt dem Impuls der Teilchen eine bestimmte Wellenlänge entspricht. Dabei können z. B. Elektronen sehr kurze Wellenlängen haben, was zur Entwicklung von hochauflösenden Elektronenmikroskopen führte.

Nach der Heisenbergschen Unschärferelation ist aber der Impuls von Teilchen bzw. Wellen nicht genau festgelegt, sondern er besitzt die Unschärfe Δp . Dies überträgt sich nach der de Broglie-Beziehung auch auf die Wellenlänge, auch sie hat eine entsprechende Unschärfe $\Delta \lambda$.

Damit haben wir schon unser ganzes Handwerkszeug und können uns den „Geheimnissen“ der Quantentheorie zuwenden:

Welle-Teilchen-„Dualismus“

In der Laien-Literatur liest man immer wieder von einem „Widerspruch“ zwischen dem Teilchen- und dem Wellenbild, der in der Quantentheorie aufgehoben sei durch eine „neue Logik des Sowohl-als-auch“. Um das richtig zu stellen, sollen hier zunächst einige Spezialfälle der Unbestimmtheitsrelation betrachtet werden:

a) Der Ort eines Quantenobjekts sei ein vollkommen scharfer Punkt mit beliebig kleiner Ortsunschärfe, so wie bei idealen klassischen Teilchen. Nach Heisenberg kann aber das Produkt der Unschärfen von Ort und Geschwindigkeit (oder auch Ort und Impuls) nicht beliebig klein sein. Entsprechend muss die Unschärfe der Geschwindigkeit bzw. des Impulses beliebig groß werden. Unendlich schnelle Teilchen hätten aber unendlich große Energie. Dieser Spezialfall kommt also in der Praxis überhaupt nicht vor.

Nachdem Einsteins Theorie des Photoeffekts die Existenz von Lichtteilchen, Photonen, gefordert hatte, ließ sich aus dem klassischen Strahlungsdruck des Lichts eine Formel für den Impuls dieser Photonen ableiten:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

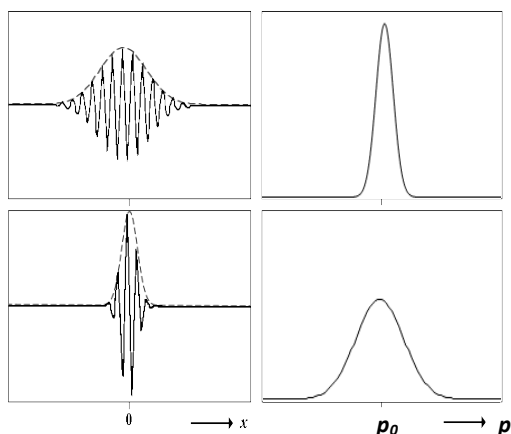
Dies ist die sog. de Broglie-Beziehung. Aus dieser folgt auch, dass ebenso wie der Impuls auch die Wellenlänge eine Heisenbergsche Unschärfe $\Delta \lambda$ aufweist, und zwar sind die relativen Unschärfen jeweils gleich:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta p}{p}.$$

b) Die Geschwindigkeit eines Quantenobjekts sei scharf bestimmt und damit auch der Impuls. Wegen de Broglie ist dann auch seine Wellenlänge scharf definiert. Klassisch betrachtet handelt es sich also um eine ideale Welle. Gemäß Heisenberg kann aber auch in diesem Fall das Produkt der Unschärfen von Ort und Geschwindigkeit nicht beliebig klein sein. Im Gegenzug zur Impulsunschärfe muss daher hier die Ortsunschärfe beliebig groß werden, so dass die Welle das ganze Universum erfüllt. Genau das ist ja die Idealvorstellung einer unbegrenzten Welle in der klassischen Physik. Aber auch die gibt es nicht in der Praxis.

c) Sowohl Ort als auch Impuls seien unscharf. Dabei können beide Unschärfen beliebig groß sein, aber gemäß Heisenberg nicht beliebig klein. In jedem Fall aber können dann Ort und Geschwindigkeit bzw. Impuls gleichzeitig gemessen werden, nur nicht beliebig genau. Dann handelt es sich also weder um ein punktförmiges Teilchen noch um eine unbegrenzte Welle, sondern um einen kurzen Wellenzug oder ein „Wellenpaket“. Solche Wellenpakete kann man auch darstellen als Überlagerung von unendlich langen Wellenzügen, deren Wellenlängen eng benachbart sind. Die Breite der Verteilung der Wellenlängen entspricht dabei wieder der Impulsverteilung des Teilchens nach der de Broglie-Beziehung.

Ein Beispiel von zwei Wellenpaketen mit jeweils gleicher Wellenlänge bzw. gleichem Impuls aber unterschiedlichen Unschärfen zeigt die folgende Grafik:¹



Links ist das Wellenpaket im Ortsraum zu sehen, und rechts die zugehörige Verteilungskurve der Impulse (bzw. Wellenlängen). Das obere Wellenpaket hat größere Ortsunschärfe als das untere Wellenpaket, aber dafür eine kleinere Impulsunschärfe. Sowohl die Hüllkurven der Ortsverteilung als auch die Impulsverteilungen sind hier jeweils Gaußkurven. Für solche Gaußkurven ist die gemeinsame Unschärfe von Ort und Impuls am kleinsten. Die Gaußkurven fallen nach beiden Seiten rasch ab, aber trotzdem verschwinden die Ausläufer auf beiden Seiten nie ganz, sondern sie erstrecken sich bis ins Unendliche.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass wir es ganz offensichtlich nicht mit einem „Gegensatz“ von Welle und Teilchen zu tun haben, sondern mit einem gleitenden Übergang zwischen zwei Grenzfällen.

Da Wellen Teilchencharakter und Teilchen Wellencharakter haben, ist offensichtlich, dass es einen fließenden Übergang zwischen beiden geben muss, wobei die klassische Vorstellung von „Welle“ oder „Teilchen“ nur jeweils die Grenzfälle einer Bandbreite von Möglichkeiten dazwischen darstellen. Zuerst sollen daher die beiden Grenzfälle betrachtet werden, und dann ein Zwischenzustand.

a) Sei zunächst $\Delta x = 0$. Dann ist gemäß Heisenberg

$$\Delta p \geq \frac{h}{2\pi \cdot \Delta x} \rightarrow \infty.$$

Der Impuls ist also vollkommen unscharf und sein Bereich erstreckt sich von minus unendlich bis plus unendlich. Ebenso wäre dann die kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{p^2}{2m} \text{ in diesem Grenzfall unendlich.}$$

b) Sei jetzt $\Delta p = 0$. Dann ist $\Delta x \geq \frac{h}{2\pi \cdot \Delta p} \rightarrow \infty$. Der Ort

ist also vollkommen unscharf und erstreckt sich bis unendlich, das Teilchen wäre also überall.

c) In der Praxis liegt also stets ein Zwischenzustand vor, bei dem sowohl Ort als auch Impuls nicht ganz scharf sind. Die kleinste gemeinsame Unschärfe, für die in der Heisenberg-Beziehung das Gleichheitszeichen gilt, sind sog. Wellenpakete mit Gauss-förmiger Hüllkurve.

Im allgemeinen Fall kann die Unschärfe beliebige Formen annehmen, die sich jeweils aus den Kräften ergeben, die auf das Teilchen wirken. Man spricht dann nicht mehr von Wellenpaketen, sondern von einer Wellenfunktion, die sich vermittle der Schrödingergleichung berechnen lässt.

¹ http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/1/pc/pc_11/pc_11_01/pc_11_01_01.vlu/Page/vsc/de/ch/1/pc/pc_11/pc_11_01/pc_11_01_06.vscml.html

Niels Bohr nannte das „Komplementarität“, also gegenseitige Ergänzung: Die kurzen Wellenpakete sind mehr Teilchen-artig, die langen sind mehr Wellen-artig. Dagegen sind reine Teilchen bzw. reine Wellen nur überholte Vorstellungen aus der klassischen Physik, die es in der Praxis gar nicht gibt.

Die „neue Logik des sowohl als auch“ ist also nichts weiter als ein verbreitetes Missverständnis.

Heisenbergs „Potentialität“

In seiner Schrift „Physik und Philosophie“ äußerte Heisenberg seine Gedanken zur philosophischen Einordnung der neuen Quantentheorie. Ihm war klar, dass es sinnlos sei, von der klassischen „Bahn“ eines Teilchens zu sprechen. Schon der Ort ist unscharf, also auch die Bahn. Dies zeigt auch ein einfaches Experiment, das bereits aus der klassischen Physik bekannt war und das heutzutage auf T-Shirts aufgedruckt wird:



Wenn eine Welle frontal durch zwei nebeneinanderliegende Spalte geht, egal ob Licht oder Schall oder Wasserwellen, dann überlagern sich die austretenden beiden Teilwellen und zeigen ein charakteristisches Muster von Wellenbergen und -Tälern, ein sog. Interferenzmuster. Eine Welle kann also gleichzeitig durch beide Spalte gehen. Aber ein Teilchen? Licht besteht ja aus Photonen-Teilchen! Doch auch wenn das Experiment mit einzelnen Photonen nacheinander durchgeführt wird, zeigt sich dasselbe Interferenzmuster. Also geht auch jedes einzelne Teilchen durch beide Spalte gleichzeitig. Es ist tatsächlich nichtlokal.

Auch Elektronen, Protonen usw. zeigten solche Interferenzmuster. Alle Teilchen sind also nichtlokal. Auch die Schrödingergleichung liefert ja nicht die Bahn eines Teilchens, sondern nur die zeitliche Entwicklung seiner Ortsunschärfe, die sog. Wellenfunktion.² Was ist also das Wesen dieser Wellenfunktion, fragte sich Heisenberg. Seine Antwort: sie „enthält Aussagen über Wahrscheinlichkeiten oder besser Tendenzen (Potentia in der aristotelischen Philosophie), und diese Aussagen sind völlig objektiv...“³

So kam der Begriff der „Potentialität“ in die Quantenmechanik. Mit „Potenz“ hat das aber nichts zu tun, sondern es ist vielmehr laut Duden die „Möglichkeit, wirklich zu werden, einzutreffen“.⁴ Heisenberg sagt also, die Wellenfunktion gibt an, wo es möglich ist, das Teilchen bei einer Messung zu finden. Das ist klar.

Leider haben aber manche Autoren aus dem Wort „Potentialität“ doch die „Potenz“ herausgelesen und damit geglaubt, die Wellenfunktion „zwinge“ dem Teilchen sein Verhalten auf. Und so sei diese Wellenfunktion etwas Transzendentes, das auf die natürliche Welt einwirkt.⁵ Auf das Teilchen wirkt aber nicht die Wellenfunktion, sondern es wirken nur äußere Kräfte, beispielsweise elektrische oder magnetische Felder. Aus diesen Kräften wird die Wellenfunktion mit Hilfe der Schrödingergleichung berechnet. Die Wellenfunktion ist also der mathematische Ausdruck dafür, wie die Kräfte die Unschärfe des Teilchens beeinflussen.

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x) \cdot \psi(x,t)$$

ist die Schrödingergleichung für die Wellenfunktion $\psi(x,t)$ eines Teilchens, die im hier im einfachsten Fall nur von einer Ortskoordinate x und der Zeit t abhängen soll. Auf der linken Seite dieser sog. Differenzialgleichung steht die zeitliche Änderung der Wellenfunktion. Auf der rechten Seite enthält der erste Term die Masse m des Teilchens und repräsentiert damit die Trägheitskräfte, die die räumliche Krümmung der Wellenfunktion bedingen. Der zweite Term enthält ein Potential $V(x)$, das die Anziehungs- und Abstoßungskräfte repräsentiert, die auf das Teilchen wirken. Die Masse m und das Potential der Kräfte V bestimmen also die Form der Wellenfunktion.

² Beispiele von Wellenfunktionen sind auch die oben dargestellten Wellenpakete

³ Werner Heisenberg, Quantentheorie und Philosophie, Hrsg. Jürgen Busche, Reclam Nachdruck 2015, S.

⁴ <https://www.duden.de/rechtschreibung/Potenzialitaet>

⁵ Hans-Jürgen Fischbeck, Vortrag für die Göttinger Gruppe der Gesellschaft für Glaubensreform, 29.06.2020.

Verschränkung

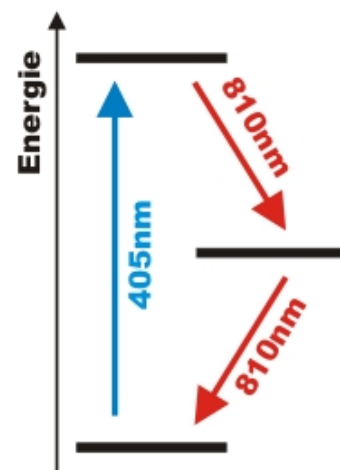
Bisher wurden nur jeweils einzelne Mikroteilchen betrachtet. Wenn ein System aber aus zwei oder mehr Teilchen besteht, können Zustände auftreten, bei denen die Unschärfen der einzelnen Teilchen voneinander abhängig sind. Die Teilchen sind dann untereinander korreliert. Dies wird als Quantenverschränkung bezeichnet.

Verschränkte Zustände sind sehr häufig. Verschränkung entsteht immer dann, wenn Teilchen miteinander wechselwirken und es danach verschiedene, aber aufeinander abgestimmte Möglichkeiten gibt, wie sie sich weiter verhalten.⁶

Als Beispiel soll hier ein gängiges Experiment mit Photonen betrachtet werden. Zu dessen Verständnis ist eine kurze Vorbetrachtung nützlich:

Photonen, die Quanten des Lichts und allgemein der elektromagnetischen Wellen, haben als Bestimmungsgrößen nicht nur Ort und Wellenlänge bzw. Impuls, sondern zudem noch einen Spin, also einen „Drall“. Dieser entspricht bei klassischen elektromagnetischen Wellen der zirkularen Polarisation, die z. B. aus der Fotografie bekannt ist. Die Polarisation rührt daher, dass das elektromagnetische Feld eine Schraubendrehung längs der Ausbreitungsrichtung der Welle vollführt. Die Drehung kann rechts- oder linksherum erfolgen. Entsprechend steht der Spin der Photonen entweder parallel oder antiparallel zur Flugrichtung.

Bei dem Experiment werden in einem atomaren Prozess zwei Photonen gleichzeitig erzeugt. Dies gelingt durch eine sog. Atomkaskade.⁷ Bei einer Atomkaskade werden aufgrund der inneren Struktur bestimmter Atome von diesen immer genau zwei Photonen gleichzeitig emittiert, wie die nebenstehende Grafik verdeutlicht:



Dazu wird mit kurzwelligem Licht die Elektronenhülle der Atome aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand gebracht, der den gleichen Drehimpuls („Drall“) wie der Grundzustand hat. Dann kann die Hülle nicht in den Grundzustand zurückfallen, indem sie ein einzelnes Photon aussendet, denn sie könnte diesem keinen extra Spin mitgeben. Stattdessen kommt es zur Aussendung von zwei gleichen Photonen, die sich gegenseitig ihren Spin vermitteln, so dass eines der Photonen einen „Rechtsdrall“, also den Spin parallel, das andere aber einen Linksdrall, also Spin antiparallel erhält.

Nun gibt es genau wie bei der Unbestimmtheit von Ort und Impuls in der Quantendynamik auch eine Unbestimmtheit der Spins: nur der Gesamtspin beider Photonen ist festgelegt. Er ist Null. Aber es ist vollkommen unbestimmt, welches Photon den parallelen Spin hat und welches den antiparallelen. Wiederholte Messungen an dem System ergeben dann zufällig mal die eine oder die andere Möglichkeit mit gleicher Häufigkeit. Aber es kommt nie vor, dass beide Spins gleiche Richtung haben, da der Gesamtspin = 0 bei der Emission festgelegt wurde.

Einsteins vermeintliche „spukhafte Fernwirkung“

Mit der Absicht, die Quantentheorie ad absurdum zu führen, stellten nun Einstein, Podolski und Rosen die Frage, was passiert, wenn die beiden Teilchen weit auseinanderfliegen und erst dann die Messung der Spins erfolgt?⁸

⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenverschränkung>

⁷ <https://www.quantumlab.nat.fau.de/>

⁸ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?, Phys. Rev. 47 (1935), S. 777–780

Gemäß der Quantentheorie entscheidet sich ja erst bei der Messung, welches Teilchen welchen Spin definitiv hat. Denn auch wenn die beiden weit auseinander geflogen sind, gibt es doch immer noch eine nicht verschwindende Überlappung durch die bis ins Unendliche reichenden Ausläufer der Wellenpakete. Sie sind dadurch immer noch korreliert, und die Messung des ersten Teilchens muss auch das zweite Teilchen in einen definierten Spinzustand versetzen, und zwar instantan, also mit Überlichtgeschwindigkeit! Das kam Einstein absurd vor, und er sprach im Briefwechsel mit Max Born von „spukhafter Fernwirkung“.⁹

Eine Möglichkeit, die Frage experimentell zu überprüfen, fand sich erst im Jahr 1964, als John Bell seine berühmte Ungleichung aufstellte. Daraufhin gab es eine ganze Serie von Experimenten, bei denen mit wachsender Raffinesse alle möglichen Fehlerquellen (sog. Schlupflöcher) ausgeschlossen wurden. Ein eindrucksvolles Experiment der Gruppe um Anton Zeilinger verwendete bei der Messung einen Abstand der beiden Photonen von 143 km zwischen den Inseln La Gomera und Teneriffa. Tatsächlich ergaben bisher alle Experimente, dass beide Teilchen gleichzeitig in den definierten Spinzustand übergehen, auch wenn zunächst nur eines gemessen wird.

Es ist aber nicht möglich, auf diese Weise Information mit Überlichtgeschwindigkeit zu übertragen, denn man kann ja die Spinrichtung des zuerst gemessenen Teilchens nicht willentlich beeinflussen. Sie unterliegt ja dem absoluten Zufall. Auch wird dabei keine Energie übertragen. Daher besteht überhaupt kein Widerspruch zur Relativitätstheorie. Einstein hatte sich geirrt, die Mikrowelt ist tatsächlich nicht-lokal.

Einsteins „Gespensterfeld“

Auf andere Weise versuchte Einstein, die Determiniertheit der klassischen Physik zu retten. In der Diskussion mit Nils Bohr postulierte er als Alternative zur Wellenfunktion der Quantentheorie ad hoc ein Feld, das selbst nicht messbar ist, das aber die Mikroteilchen so führt, dass sich die gleichen Interferenzmuster bilden wie in der Quantentheorie. Dieses Feld wäre dann für die Nichtlokalität, zuständig, während die Teilchen selbst sich klassisch deterministisch bewegen. Dieses Feld nannte er damals „Gespensterfeld“.¹⁰ Allerdings erkannte er später, dass dabei der Satz von der Erhaltung der Energie bzw. Masse verletzt wurde. Deshalb hat er das Modell nicht weiterverfolgt und auch nie schriftlich veröffentlicht.

Ironischerweise wurde der Begriff „Gespensterfeld“ ins Englische übersetzt als „ghost field“. Von dort zurück ins Deutsche übersetzt mutierte er zu einem „Geisterfeld“. Daraus wurde dann für manchen Laien der „Geist Gottes“, den „die Physiker“ angeblich entdeckt hätten!

Dekohärenz und der Übergang von den Quanten zur klassischen Physik

Schon die „Gesetze“ der klassischen Physik, Impulserhaltung, Energieerhaltung, usw., galten streng nur für „Abgeschlossene Systeme“, die keinerlei Einflüssen von außen unterlagen. Wie selbstverständlich setzte man dies in den ersten Jahrzehnten auch für die Quantentheorie voraus. Das darauf basierende „Kopenhagener Modell“¹¹ hatte aber die Schwierigkeit, dass für Messungen an Quantensystemen immer eine separate klassische Welt angenommen werden musste, obwohl man doch wusste, dass auch diese klassische Welt aus Quanten aufgebaut war. Schrödinger machte dies Problem sehr deutlich mit seiner Katze im unbestimmten Quantenzustand zwischen Leben und Tod.

⁹ Albert Einstein, Max Born. Briefwechsel 1916–1955. München (Nymphenburger) 1955, S. 210.

¹⁰ Albert Einstein: „Autobiographisches“ (deutsch) in: „Albert Einstein Philosoph-Scientist“, herausgegeben und mit englischer Übersetzung versehen von Paul A. Schlipp, The Library of Living Philosophers, Inc., Evanston, Illinois 1949. Deutsche Ausgabe: „Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher“, Stuttgart : Kolhammer, 1955.

¹¹ Siehe z. B. Werner Heisenberg, Quantentheorie und Philosophie, Hrsg. Jürgen Busche, Reclam Nachdruck 2015, S. 42-61.

Erst im Jahr 1970 erschien eine Arbeit mit einem neuen Ansatz von Hans-Dieter Zeh.¹² Unter der Prämisse, dass es eine separate klassische Welt nicht gibt, also die Welt nur aus Quanten besteht, wies er nach, dass es überhaupt kein abgeschlossenes System geben kann: „*the only closed system is the universe as a whole.*“

Auch jedes Messgerät ist dann ein Quantensystem, das sich bei der Messung mit dem viel kleineren Messobjekt verschränkt. Die Verschränkung, also die Abhängigkeit der Unbestimmtheiten des Objekts von den viel größeren Unbestimmtheiten des Messgeräts, ist dann so stark, dass das Objekt in seinen Möglichkeiten ganz eingeengt wird auf einen genauen Punkt auf einer Photoplatte, oder eine genaue Wellenlänge (bzw. Impuls) eines Interferenzmusters, je nach Messmethode. Durch die Verschränkung verhält sich das Objekt also scheinbar klassisch inkohärent.

Aber welcher Ort genau oder welcher Impuls genau sich einstellt, das lässt sich prinzipiell nicht vorhersagen. Bei vielfacher Wiederholung der Messung ergibt sich deshalb jedes Mal ein neuer Messwert. Dies wird oft als „Quanten-Zufall“ bezeichnet. So entstehen z. B. bei einer Ortsmessung auf der Photoplatte verstreute Punkte, die aber nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern ein Interferenzmuster (s.o.) bilden. Nur dieses Muster ist exakt determiniert und lässt sich mit der Schrödingergleichung vorausberechnen.

In gleicher Weise ist auch das Messgerät selbst mit seiner Umgebung verschränkt, und diese Umgebung wieder mit der weiteren Umgebung usw. So verhält sich unsere ganze tägliche Welt scheinbar klassisch, obwohl sie aus Quanten besteht. „Auf dem Papier“ gibt es dann viele Welten,¹³ für jede der vielen unterdrückten Möglichkeiten eine, aber in der Praxis gibt es nur die eine Welt, in der wir leben.

Durch die Erkenntnis über den Dekohärenzprozess ist es also möglich geworden, den im Kopenhagener Modell ad hoc geforderten „Kollaps der Wellenfunktion“¹⁴ nunmehr ohne zusätzliche Annahmen direkt aus der Quantentheorie heraus zu verstehen.¹⁵ Das Kopenhagener Modell hatte damit ausgedient. Es dauerte aber noch 20 Jahre, bis sich die neue Sichtweise durchsetzte.¹⁶

Wir können also festhalten, dass tatsächlich „alles mit allem verschränkt“ ist. Aber Verschränkung ist nur eine Korrelation der Unschärfen. Sie bedeutet also keine Wechselwirkung, keinen kausalen Zusammenhang und keine Übertragung von Information („*entangled but decoupled*“¹⁵ d.h. verschränkt aber entkoppelt). Vielmehr ist es gerade diese Verschränkung, die unsere makroskopische Welt so schön einfach und klassisch erscheinen lässt, dass wir von den Quanten gar nichts merken. Genau deshalb hat der Mensch die Quanten erst nach Millionen Jahren entdeckt.

Die Vorstellung mancher Laien, dass „alles mit allem zusammenhänge“ hat also keine wissenschaftliche Grundlage.

Genauso abwegig ist die sog. „Quanten-Ontologie“, die Vorstellung, das menschliche Bewusstsein sei so etwas wie ein Quantencomputer, ein „makroskopischer Quantenzustand“, der auch noch mit einem „universalen Quantenbewusstsein“ in einer Art Internetverbindung stehe.¹⁷ Gerade wegen der Dekohärenz ist es ja so schwierig, einen Quantencomputer zu bauen. Er muss ganz nahe am absoluten Nullpunkt der Temperatur betrieben und sorgfältig abgeschirmt werden. Und trotzdem funktionieren bisher nur Prototypen mit wenigen QBits. Bei Zimmertemperatur ist da gar nichts zu machen.

¹² H. D. Zeh, „On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory“, Foundations of Physics, Vol 1, No. 1, 1970. Abzurufen unter <http://www.rzuser.uni-hd.de/~as3/FP70.pdf>

¹³ Hugh Everett III: „Relative State“ Formulation of Quantum Mechanics. In: Reviews of modern physics. Vol. 29, 1957, S. 454

¹⁴ von Neumann, J., 1932, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin: Springer.

¹⁵ W. H. Zurek, Quantum Darwinism, Classical Reality, and the randomness of quantum jumps, Physics Today 67, 10, 44 (2014)

¹⁶ W. H. Zurek, Decoherence and the transition from quantum to classical, Physics Today 44 (10) 36-44 (1991)

¹⁷ Hans-Jürgen Fischbeck, Die Wahrheit und das Leben - Wissenschaft und Glaube im 21. Jahrhundert, Utzverlag München (2005 und 2020). Siehe dazu den Kommentar <http://quantum-mind.co.uk/theories/penrose-and-hameroff/>

Quantenfelder

Seit der Entdeckung der Radiowellen durch Heinrich Hertz war bekannt, dass das sichtbare Licht nur einen Ausschnitt des allgemeinen Spektrums der elektromagnetischen Wellen darstellte. So haben wir heutzutage Rundfunk, Fernsehen und Mobiltelefone. Gemäß der klassischen Elektrizitätslehre handelte es sich bei diesen Wellen um elektrische und magnetische Felder, die sich ständig gegenseitig abwechseln.

Aber wenn Licht aus Energiequanten, Photonen bestand, so musste das auch für die Radiowellen gelten. Diese Frage führte zur Entwicklung der Quanten-Elektrodynamik: zwischen elektrischem und magnetischem Feld gilt ebenso wie für Ort und Impuls eine Unschärferelation, und die im elektromagnetischen Feld gespeicherte Energie E hat diskrete Stufen $E = n \cdot h \cdot \nu$ wobei n die Anzahl der Photonen und $h \cdot \nu$ das Plancksche Energiequantum ist. Die Photonen sind also die angeregten Energiezustände des Elektromagnetischen Feldes.

Aber auch alle anderen Teilchen sind ja gemäß der Einsteinformel $E = mc^2$ kleine Energiepakete. Und auch diese können aus dem Vakuum erzeugt werden, wenn die entsprechende Energie zugeführt wird, beispielsweise in dem großen Teilchenbeschleuniger am CERN. Daher kann man auch diesen entsprechenden Teilchenfelder zuzuordnen, deren energetische Anregungszustände dann die Teilchen selbst sind. Diese verallgemeinerte Theorie für alle Teilchen ist die sog. Quantenfeldtheorie (QFT). Julian Schwinger, Richard Feynman und Shin'ichirō Tomonaga erhielten dafür den Nobelpreis (1965).

Die Quanten-Mechanik ist nur anwendbar auf Systeme, deren Teilchenzahl sich nicht ändert. Sie kann also beispielsweise nicht die Emission und Absorption von Photonen beschreiben, wobei Teilchen erzeugt oder vernichtet werden, und auch nicht die uns vertrauten Radiowellen oder Laserlicht, bei denen die Teilchenzahl quantenphysikalisch unbestimmt ist. Für solche Fälle wurde die Quantenmechanik weiterentwickelt zur sog. Quanten-Feldtheorie (QFT).

In der QFT werden die Wellenfunktionen ersetzt durch sog. Feldoperatoren, die Teilchen an einem bestimmten Ort oder mit einem bestimmten Impuls erzeugen oder vernichten. Wenn also ein Teilchen von A nach B fliegt, wird das aufgefasst als Erzeugung eines Teilchens bei A und Vernichtung desselben bei B. Und wenn ein Teilchen aus seiner Bahn gestoßen wird und dadurch seinen Impuls ändert, wird das aufgefasst als Vernichtung eines Teilchens mit Impuls 1 und Erzeugung eines Teilchens mit Impuls 2. Das Resultat ist dann dasselbe, denn die Teilchen besitzen keine eigene Individualität.

Es gibt also Felder für alle Elementarteilchen: Elektronenfelder, Protonenfelder, Mesonenfelder, Quarkfelder und auch das Higgs-Feld. Alle Teilchenfelder sind nach der QFT im ganzen Universum vorhanden. Alle Teilchenfelder sind nach der QFT im ganzen Universum vorhanden, aber sie sind im Grundzustand und bilden so alle zusammen den „Vakuumzustand“ des Universums. Von diesem geht keinerlei Wirkung aus. Erst die Anregungszustände der Felder, die jeweiligen Teilchen, können Wirkung entfalten, indem sie Kräfte aufeinander ausüben.

So hat auch das Elektrische Feld im Grundzustand keinerlei Wirkung. Seine Kraftwirkung zwischen den Teilchen entsteht nur durch den kurzzeitigen Austausch seiner angeregten Zustände, der Photonen.

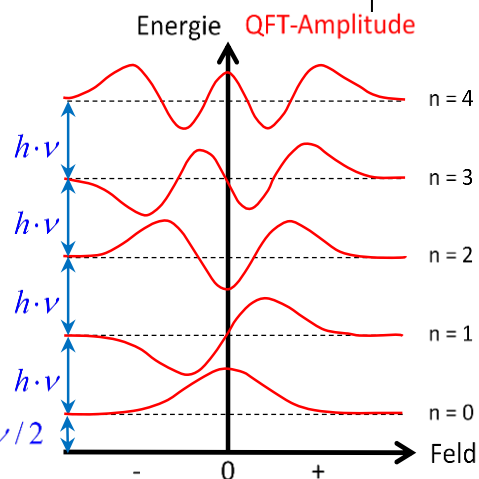
Auch das Higgsfeld hat im Grundzustand keinerlei Wirkung. Aber andere Teilchen können es für ganz kurze Zeit in einen angeregten Zustand überführen (genannt virtueller Zustand, oder Fluktuation). Die für die Fluktuationen benötigte Energie verleiht den Teilchen dann ihre Masse- Eigenschaft. Um einen dauerhaft angeregten Zustand, also ein Higgs- Teilchen, zu erzeugen, braucht man allerdings den riesigen Beschleuniger am CERN. Die gespeicherte Energie verleiht den Teilchen die Eigenschaft Trägheit und Schwere, die wir „Masse“ nennen, gemäß der Einsteinformel $m = E / c^2$. **Masse ist also eine Eigenschaft der Energie.**

Die Quantenfeldtheorie (QFT) berücksichtigt auch die Spezielle Relativitätstheorie und ist deshalb das wichtigste Werkzeug in der Physik der Elementarteilchen. Unter anderem führte sie zur Entdeckung der Antiteilchen.

Klassische elektromagnetische Wellen sind in einfachster Form sinusförmig, mit definiertem Impuls und mit bestimmter elektrischer und magnetischer Feldstärke. Dagegen gilt für Photonen in der QFT eine Unschärferelation zwischen beiden Feldern. Dadurch erhalten beide Felder eine gewisse Unschärfe, eine Verteilung von Feldstärken. Für das elektrische Feld ist diese Verteilung im folgenden Diagramm aufgetragen für 0 bis 4 Photonen im selben Zustand (in rot). Dabei sind die Nulllinien (gestrichelt) entsprechend der jeweiligen Anregungsenergie der Zustände nach oben verschoben:

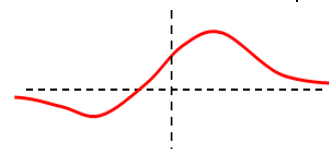
Auch wenn kein Photon vorhanden ist, also im Grundzustand mit $n = 0$, hat das Feld schon eine Verteilung, verbunden mit einer gewissen Energie, der sog. Nullpunktsenergie. Denn auch für diesen Zustand gilt die Unschärferelation, d. h. das elektrische Feld kann nicht den scharfen Wert null haben sonst wäre die Unschärfe des Magnetfelds unendlich. Jedoch ist der Mittelwert des Feldes null, denn die Verteilung der Unschärfe ist symmetrisch.

Wenn von diesem Grundzustand aus ein Photon erzeugt wird, geht der Zustand $n = 0$ in den Zustand $n = 1$ über. Dafür muss das Plancksche Quantum der Energie, $\Delta E = h \cdot \nu$ aufgewandt werden. (Die Nullpunktsenergie ist genau halb so groß). Dieser Zustand hat „ungerade Parität“, d. h. er ist antisymmetrisch.



Hier aufgetragen ist aber die Amplitude der Feldverteilung, entsprechend der Wellenfunktion in der Quantenmechanik. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Feldes ist das Quadrat der Amplitude, die Intensität, und damit auf beiden Seiten positiv und symmetrisch. Dies gilt auch für alle höheren Zustände mit größerer Photonenzahl n . Im Mittel ist also die Feldstärke immer null.

Aber wie kommt dann das oszillierende Feld der klassischen elektromagnetischen Wellen zustande? Dafür benötigen wir eine Überlagerung, eine Superposition, beispielsweise der Zustände $n = 0$ und $n = 1$. Dazu müssen wir die QFT-Amplituden beider Zustände addieren. Dann addieren sich rechten Seiten aber die linken Seiten subtrahieren sich. Damit erhalten wir in etwa nebenstehende Verteilung. Nun ist der Schwerpunkt des Amplitudenquadrats eindeutig rechts. Aber die Verteilung ist nicht stationär, sondern sie oszilliert gemäß der Quantentheorie mit der Frequenz $\nu = \Delta E / h$ hin und her.



Wir haben also schon die Andeutung einer Schwingung, aber dafür mussten wir die Zustände mit $n=0$ und $n=1$ überlagern, also ist die Photonenzahl n jetzt nicht mehr scharf! Wenn wir nun mehr und mehr Zustände mit höherem n hinzunehmen, wird die Feldstärkeverteilung nach und nach immer schärfer aber die Photonenzahl immer unschärfer. Es gibt also auch eine Unschärferelation zwischen diesen beiden, die nach Julian Schwinger benannt ist.

Für vollkommen scharfe Phasenlage brauchen wir dann unendlich viele Photonen, die aber nicht alle gleichen Anteil haben, sondern eine sog. Poisson-Verteilung. Erst dann haben wir den Grenzfall einer vollkommen klassischen Welle vor uns, wie sie in den Radiowellen oder im Laserstrahl vorliegt. Da alle diese Photonen-Anteile eine feste Phasenbeziehung untereinander haben, spricht man auch von einem „Kohärenten Zustand“.

Zusammenfassung

Die Quantentheorie hat für den Physiker keine mystische Bedeutung, sondern ist ein Werkzeug, um die Welt zu verstehen. Sie hat neue Erkenntnisse gebracht über das Verhalten kleinster Teilchen, aus denen die Welt, soweit wir sie kennen, aufgebaut ist. Natürlich wissen wir nicht, was sich hinter der dunklen

Materie verbirgt, und was hinter der dunklen Energie. Auch ist die Quantenfeldtheorie nur kompatibel mit der speziellen Relativitätstheorie Einsteins. Eine Vereinigung mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, also die „Weltformel“, wie sie Heisenberg vorschwebte, gibt es bisher nicht.

Wir werden sowieso niemals „alles“ wissen, denn es gibt keinen Archimedischen Punkt außerhalb. Wir sind immer Teil des Systems.

Aber die Quantentheorie als solche ist heute gut verstanden. Sie ist die am genauesten bestätigte Theorie der Physik überhaupt. Leider ist die Theorie aber ohne Mathematik nicht vollständig nachvollziehbar. Das macht es für den Laien schwierig, ein angemessenes Verständnis dafür zu entwickeln und gibt daher leider auch Anlass zu manchen Spekulationen über die „Potenzialität“ der Wellenfunktion, über „Informationsfelder“ und „Transzendenz“, über die die Physiker (bis auf sehr wenige Ausnahmen) nur den Kopf schütteln können.

So sagte Hans-Peter Dürr „*es gibt keine Materie*“ und „*man könnte es Geist nennen*“.¹⁸ Aber damit meinte er nur, dass die Elementarteilchen ja gemäß der QFT kleine Energiepakete sind und nichts festes wie Sandkörnchen. Trotzdem verhalten sich diese Energiepakete, wenn sie in großer Zahl aneinander gebunden sind, also im makroskopischen Verbund, wie fester Stoff, und den nennen wir nach wie vor „Materie“. Und wir nennen nicht alles „Geist“, was aus Materie besteht, nicht jeden Schmutz und Müll. Leider stiftete Dürr aber mit seiner Wortwahl große Verwirrung unter gläubigen Menschen, die dahinter den Heiligen Geist vermuten und nicht einfach ein winziges Klümpchen Energie.

Und so sagte Anton Zeilinger, dass „Information ein wesentlicher Grundbaustein der Welt“ sei.¹⁹ Aber damit sagt er nur, dass die Elementarteilchen keine eigene Individualität haben. Die Teilchen einer bestimmten Sorte, beispielsweise Elektronen, sind nicht voneinander unterscheidbar. Man kann also zwei Teilchen austauschen, ohne dass sich etwas geändert hat. Darauf beruht die sog. „Austausch-Wechselwirkung“, die in der Chemie eine ganz wichtige Rolle spielt.

Wenn man nun ein bestimmtes Teilchen in einem bestimmten quantenmechanischen Zustand hat und kopiert durch einen gewissen Trick diesen Zustand auf ein weit entferntes Teilchen gleicher Sorte, so ist das Ergebnis exakt das gleiche, als wenn man das erste Teilchen dorthin transportiert hätte. Tatsächlich hat man aber nur die Information übertragen. Solche Experimente hat Zeilinger 1997 als erster durchgeführt und nannte sie „Quanten-Teleportation“.²⁰ Seitdem nennt man ihn auch „Mr. Beam“. Aber auch er muss sich mit Esoterikern herumschlagen: „*Esoteriker kontaktieren mich tatsächlich immer wieder. Aber die sind naiv. Es ist ihnen nicht klar, wie knallhart mathematisch unsere Aussagen sind.*“²¹

Wir danken Jürgen Schnakenberg für wichtige Anregungen und Hinweise.

¹⁸ Hans-Peter Dürr, *Warum es ums Ganze geht*, Hrsg. Dietlind Klemm und Frauke Liesenborghs, oekom Verlag München 2009.

¹⁹ <https://www.heise.de/tp/features/Es-stellt-sich-letztlich-heraus-dass-Information-ein-wesentlicher-Grundbaustein-der-Welt-ist-3448658.html>

²⁰ D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Experimental Quantum Teleportation*, *Nature* **390**, 575–579 (1997).

²¹ <https://www.profil.at/home/anton-zeilinger-den-gott-337248>