

**$\langle \text{bra} |$  und  $| \text{ket} \rangle$  und Schrödingers Katze**  
**Teil 4: Moderne Sicht der Quantenphysik**  
von Seejay

Im dritten Teil meiner Serie habe ich euch mit Versuchen vertraut gemacht, für den Kollaps der Zustandsfunktion das Bewusstsein eines Beobachters verantwortlich zu machen, was zu einigen haarsträubenden gedanklichen Konstruktionen führte. In diesem letzten Teil will ich euch zeigen, dass moderne Erkenntnisse der Quantenphysik diese Akrobatik überflüssig machen, weil die Realität tatsächlich noch viel verrückter ist.

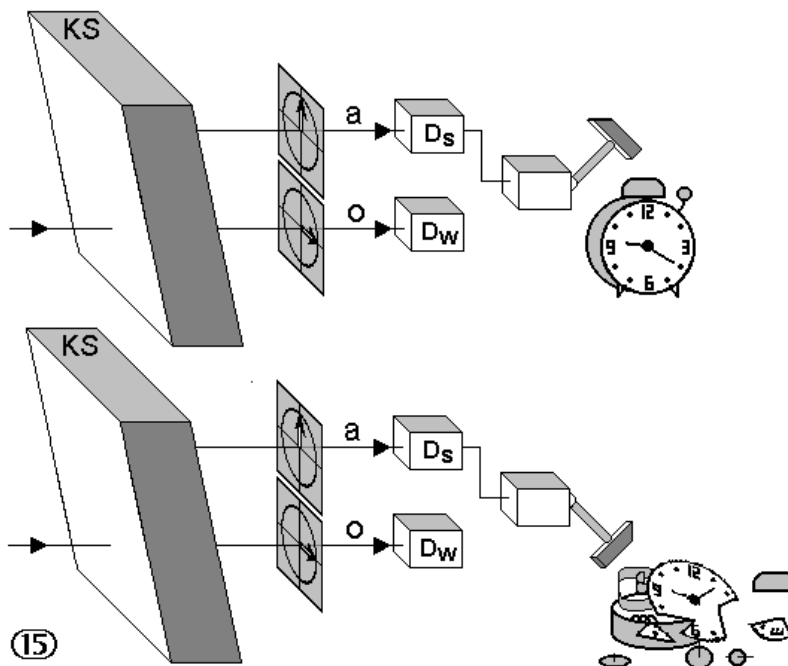
**Schrödingers Wecker**

Hier kommt mein tierfreundlicher Alternativvorschlag zu Schrödingers Katzenmassaker: Wir lassen die Katze weg und ersetzen die Gift-Phiole durch einen alten Wecker.

Nachdem wieder ein Lichtquant

$$|v\rangle = 0,8 \cdot |w\rangle + 0,6 \cdot |s\rangle$$

durch die Apparatur gelaufen ist, ist der Wecker mit 36% Wahrscheinlichkeit zerstört. Er befindet sich aber nicht in einem Überlagerungszustand, sondern wenn der Beobachter nun die Kiste öffnet, sieht er entweder einen intakten Wecker oder einen zerstörten Wecker, der auf der Uhrzeit stehen geblieben ist, zu der ihn der Hammer traf. Genau zu diesem Zeitpunkt ist also die Zustandsfunktion kollabiert, nicht erst, als der Beobachter nachguckte. Das Nachsehen behebt nur noch das Unwissen des Beobachters und bringt ihn auf den aktuellen Stand der Dinge (Bild 15). Und was ist, wenn er einen heilen Wecker vorfindet? Na ja, man könnte an den zweiten Detektor auch noch einen Hammer anschließen ...

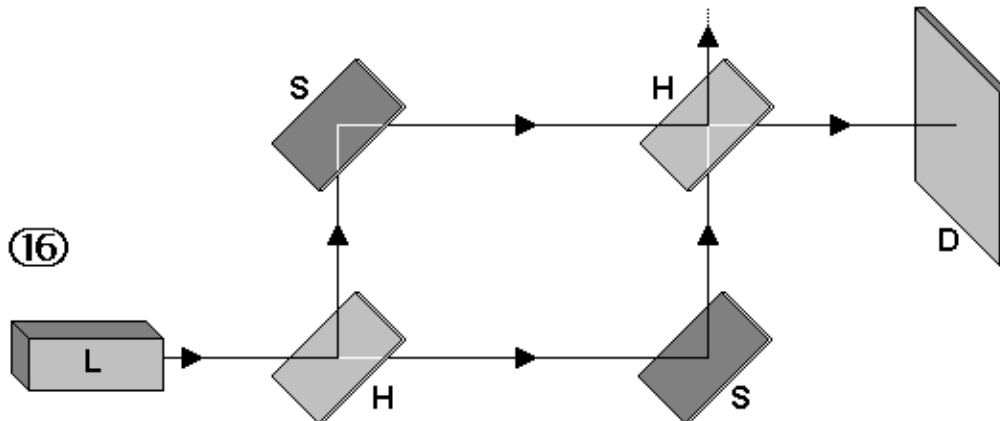


Ohne Katzen oder Wecker zu zerstören, könnte man natürlich auch eine Stoppuhr nehmen, die beim Beginn des Versuches startet und beim Eintreffen eines Lichtquants am Detektor angehalten wird. Das wäre nur weniger spektakulär. Jedenfalls legt dieses Gedankenexperiment nahe, dass es vielleicht doch nicht das Bewusstsein ist, dass die Zustandsfunktion kollabieren lässt.

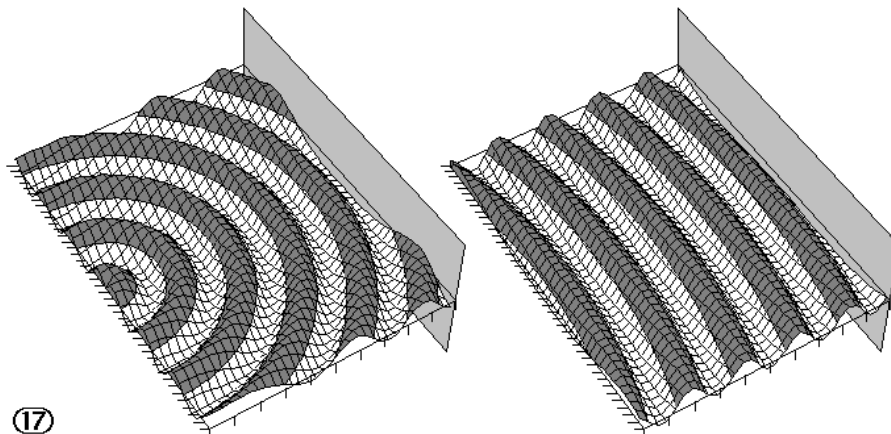
**Interferometer**

Interferometer sind, ebenso wie der Doppelspalt, gängige Instrumente zur Erzeugung und Untersuchung von Interferenzmustern. In jedem Fall braucht man zwei (scheinbare)

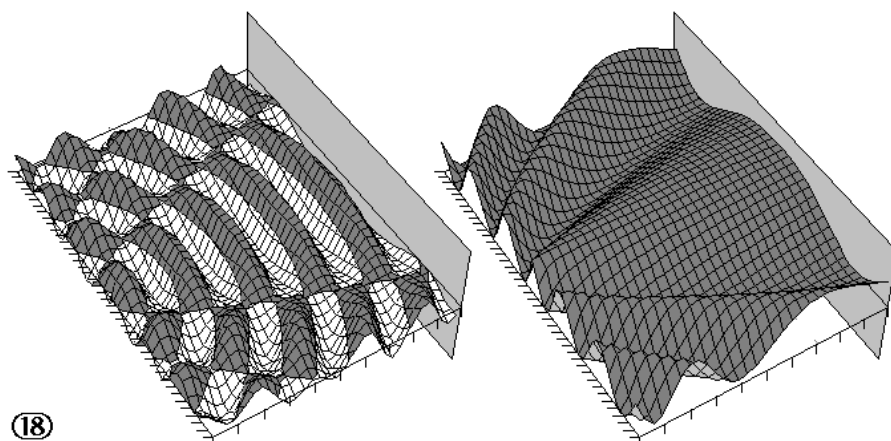
Lichtquellen. Beim Doppelspaltversuch sind es die beiden Spalte. Beim Interferometer gewinnt man sie, indem man einen Lichtstrahl mittels eines halbdurchlässigen Spiegels aufspaltet. Bild 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau.



L ist die tatsächliche Lichtquelle, H sind zwei halbdurchlässige Spiegel (Strahlteiler), S sind zwei normale Spiegel, D ist ein Detektor, zum Beispiel meine geliebte Fotoplate. Wie man sieht, erfolgt eine Aufspaltung in einen oberen und einen unteren Lichtweg, vor dem Detektor werden sie wieder zusammengeführt. Apparativ bedingt geht ein Teil des Lichts auch nach oben und könnte dort mit einem weiteren Detektor erfasst werden, spielt aber hier keine Rolle. Die beiden scheinbaren Lichtquellen (Spiegelbilder von L) stehen nunmehr aus Sicht von D *hintereinander*, während sie beim Doppelspalt *nebeneinander* stehen (die beiden Spalte). Dadurch sieht das Interferenzmuster etwas anders aus (Bild 17).



Linkes Bild: Quelle links am Rand; rechtes Bild: Quelle noch weiter links davon, Bild 18: beide Quellen. Auf der Fotoplate erscheint dann ein System von Ringen. Auch hier zeige ich euch im Bild 18 rechts zur Verdeutlichung das Betragsquadrat von  $\Psi$ :



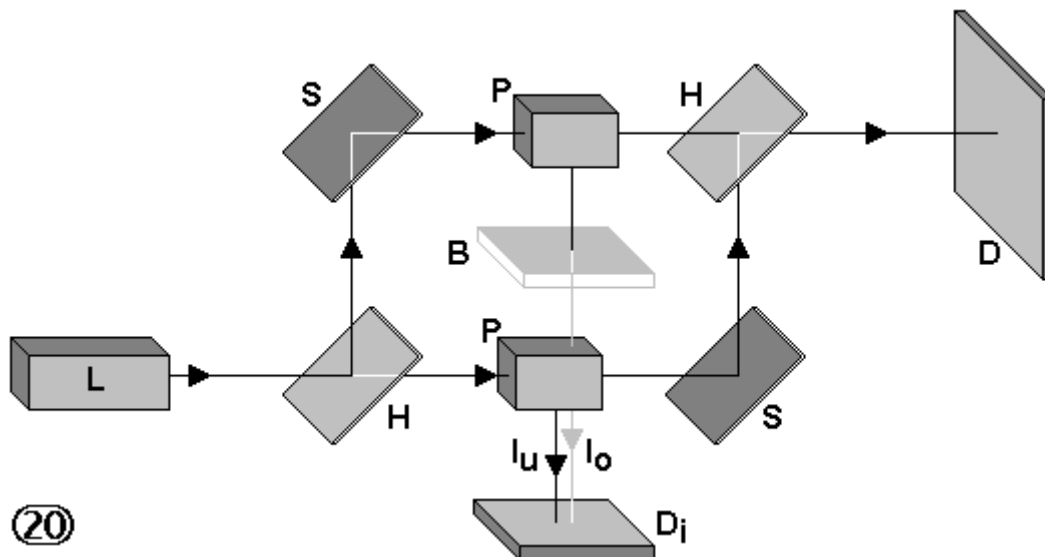
Die Ringe seht ihr da natürlich nicht, dazu bräuchte man noch eine Dimension mehr, die nicht mehr ins Bild passt. Aber in Bild 19 könnt ihr sie sehen.



Jedes Photon, das durch das Interferometer läuft, befindet sich in einem Überlagerungszustand aus „oberer Weg“ und „unterer Weg“. Würde es einen konkreten Weg nehmen, so wäre der andere irrelevant, und es könnte kein Interferenzmuster mehr geben.

Es ist nun leicht, einen der Lichtwege zu manipulieren, was beim Doppelspalt schwieriger ist, weil die Spalte so eng benachbart sind. Die Lichtwege sind zwar im Prinzip gleich lang, aber durch Verstellen der Spiegel kann man sie variieren. Im Interferenzmuster wandern dabei die Ringe nach außen, und von innen entstehen neue – oder umgekehrt. Indem man die entstehenden oder verschwindenden Ringe zählt, kann man die Wegdifferenz auf eine halbe Wellenlänge genau ausmessen. Auch Gravitationswellen werden im Prinzip auf diese Weise beobachtet.

Nun kann man in jeden Lichtweg einen nichtlinearen Kristall („parametrischen Konverter“) einfügen (wie beim Versuch zur Verschränkung), womit man aus einem hindurchgehenden Lichtquant zwei macht. Das eine läuft jeweils weiter zur Fotoplatte, das andere („Idler-Photon“, engl. idle = untätig) wird seitlich herausgelenkt und sollte es ermöglichen, zugleich den Ort (oben oder unten) des Lichtquants zu detektieren (Bild 20).



P sind die parametrischen Konverter,  $I_o$  und  $I_u$  sind die Idler-Strahlen von oben bzw. unten,  $D_i$  ist ein Detektor für die Idler-Photonen. Durch wahlweises Einfügen oder Weglassen einer Blende B kann das obere Idler-Photon blockiert oder freigegeben werden.

Jetzt kommt das Verrückte: Wenn man B einfügt, spricht  $D_i$  nur noch auf Idler-Photonen aus dem unteren Lichtweg an, man kann also lokalisieren, ob das Photon, das auf die Fotoplatte trifft, oben oder unten entlang gegangen ist. Prompt verschwindet das Interferenzmuster – und zwar selbst dann, wenn man den unteren Detektor *gar nicht auswertet*. Mit anderen Worten:

Allein die „Drohung“, man *könnte* den Ort des Photons lokalisieren, vernichtet das Muster, lässt also die Zustandsfunktion des Photons auf „oben“ bzw. „unten“ kollabieren. Die Quanten in den Hauptstrahlen sind mit denen in den Idler-Strahlen verschränkt und „wissen“ auf geheimnisvolle Weise, was jenen passiert.

Damit ist klar, dass der Kollaps innerhalb der Apparatur passiert (obwohl wir weiterhin nicht wissen, wie sie das macht) – und nicht im Bewusstsein eines Beobachters. Ihr fragt euch jetzt vielleicht, warum ich euch dann durch den ganzen Exkurs über das Bewusstsein geschleppt habe, wenn wir das nun gar nicht brauchen? Na ja, das wusste man ja vorher nicht. Außerdem sind wir doch ein SF- und Fantasy-Club. Dieser Ausflug in den philosophischen Garten exotischer Gewächse müsste eure Phantasie eigentlich inspiriert haben. Der Ansatz, das Bewusstsein für den Kollaps der Zustandsfunktion verantwortlich zu machen, war ja durchaus legitim. Seriöse Wissenschaft muss alle Möglichkeiten in Betracht ziehen, auch die abwegig erscheinenden. Erst wenn sie experimentell ausgeschlossen wurden, kann man sie verwerfen.

### **Dekohärenz**

Ehe wir uns mit *Dekohärenz* befassen, sollte besser klar sein, was Kohärenz bedeutet. In aller Kürze bedeutet es die Fähigkeit, ein Interferenzmuster hervorzubringen. Alle Lichtquanten eines reinen Zustands, z.B.  $|v\rangle$ , sind kohärent. Schickt man sie durch einen Doppelspalt oder ein Interferometer, so entsteht das entsprechende Muster. Nachdem ein Kalkspat sie sortiert hat, liegt jedoch ein Gemisch aus  $|s\rangle$  und  $|w\rangle$  vor, dieser gemischte Zustand bringt kein Interferenzmuster mehr hervor. Gleiches gilt, wenn man ihnen im Interferometer den oberen oder unteren Weg zugeordnet hat. Letztlich ist es also die Wechselwirkung mit etwas, das im Weg steht, was die Zerstörung der Kohärenz und damit die Dekohärenz bewirkt. Man stellt sich unter dem, was da im Weg steht, leicht ein Messgerät (Detektor) vor, d.h. man würde denken, die *Messung* bewirkt den Kollaps der Zustandsfunktion. Der obige Versuch mit der Blende im Lichtweg der Idler-Strahlen zeigt aber, dass es gar kein Messgerät sein muss. Die Dekohärenz tritt bereits ein, wenn *irgend etwas* im Weg steht, das eine Wechselwirkung auslöst und damit *im Prinzip* eine Messung ermöglichen *würde*.

Deswegen sind Interferenzversuche mit größeren Objekten, wie etwa Atomen, Molekülen oder Weckern in zunehmendem Maße schwierig. Mit Molekülen ist es inzwischen sogar gelungen, aber der Aufwand, sie daran zu hindern, irgendwo gegen zu stoßen, steigt mit der Größe radikal an. Jede Kollision des Versuchsobjektes mit auch nur einem albernem Luftmolekül oder einem Quant der allgegenwärtigen Wärmestrahlung wird den Kollaps und damit die Dekohärenz bewirken. Man muss also solche Versuche möglichst im Hochvakuum und bei Tiefsttemperaturen ausführen. Das macht den Katzenversuch letztlich illusorisch. Wie es einer Katze geht, die man eine Stunde im Hochvakuum bei Tiefsttemperatur aufbewahrt hat, steht fest, da braucht niemand mehr nachzusehen.

### **Der Knallertest**

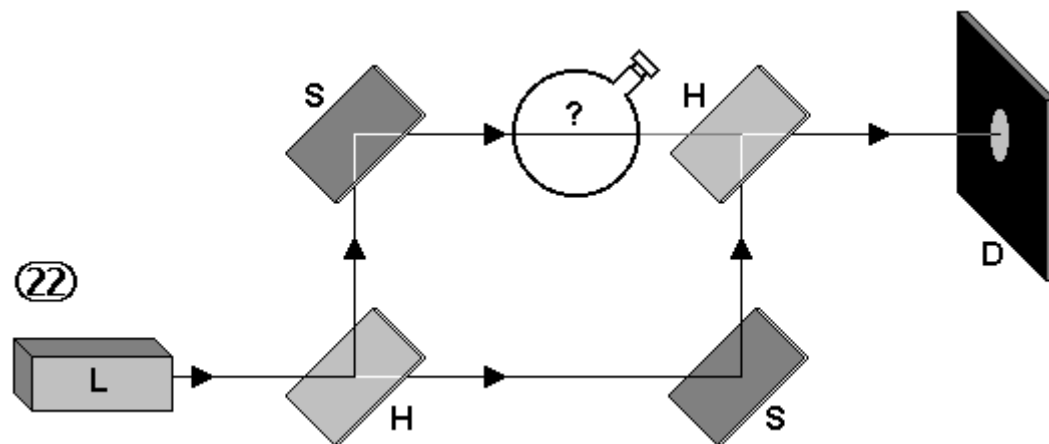
Außer Gravitationswellen zu messen, kann man mit einem Interferometer aber auch etwas völlig Abartiges machen: Bomben identifizieren, ohne sie hochgehen zu lassen (Ihr kennt „Minesweeper“?).

Knallgas ist eine explosive Mischung aus Wasserstoff und Sauerstoff, die durch einen Funken entzündet werden kann. Chlorknallgas (Wasserstoff plus Chlor) ist noch empfindlicher: bereits ein hinreichend energetisches Lichtquant (z.B. grünes Licht) bringt es zu Explosion. Stellt euch vor, in einer Fabrik wurden Ampullen mit Chlorknallgas hergestellt (wozu auch immer, vor allem wohl für diesen Gedankenversuch), aber irrtümlich nicht alle gefüllt (Bild 21):



Nun liegen im Lager leere und volle durcheinander. Chlorgas ist zwar grün, aber man kann die Dinger nur bei rotem (= niederenergetischem) Licht gefahrlos handhaben. Sobald man grünes oder gar weißes Licht einschaltet, gehen alle Ampullen mit Chlorknallgas hoch. Auf folgende Weise kann man aber zumindest einen Teil der Produktion retten:

Ein Interferometer wird so justiert, dass das Interferenzmuster in der Mitte des Detektors dunkel bleibt (vgl. Bild 19 rechts), der Rest des Detektors wird abgedeckt. Eine Ampulle nach der anderen wird nun in einen (z.B. den oberen) Lichtweg gelegt, dann wird jeweils genau *ein* energiereiches Quant hindurchgeschickt (Bild 22).



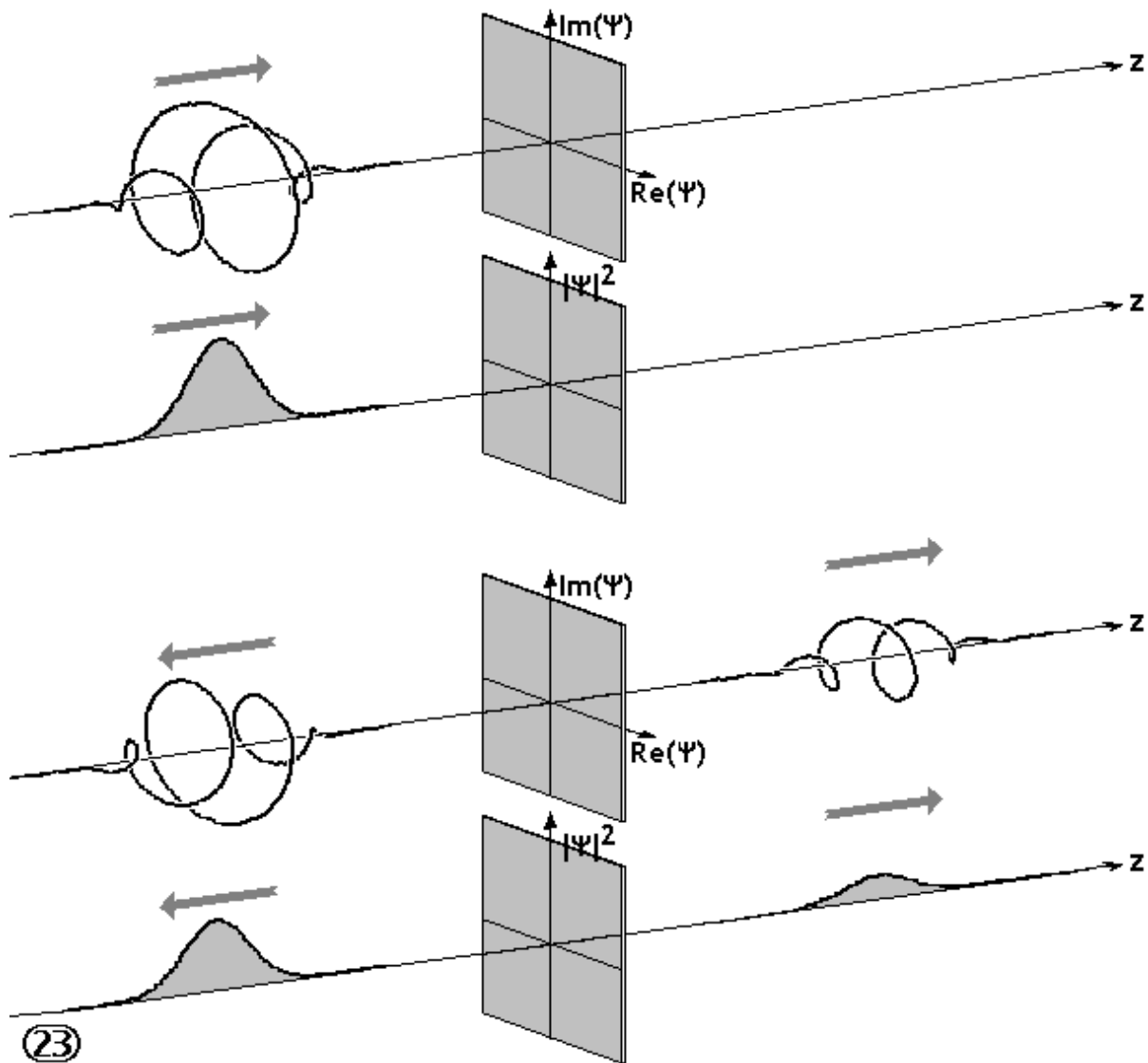
Wenn die Ampulle leer ist, ist sie durchsichtig, stört die Lichtausbreitung also nicht, und es entsteht das Interferenzmuster. Die Mitte des Detektors ist dunkel, der Detektor spricht nicht an. Man sortiert die Ampulle aus. Ist Chlorknallgas in der Ampulle, so ist sie undurchsichtig, der obere Lichtweg ist unterbrochen. Die Zustandsfunktion des Photons kollabiert auf „oben“ oder „unten“, das Interferenzmuster bleibt aus, der Detektor spricht an. Sollte dieses eine Lichtquant oben entlang gegangen sein, trifft es die Ampulle, und diese explodiert. Sollte das Lichtquant den unteren Weg genommen haben, bleibt die Ampulle heil, weil kein Lichtquant sie getroffen hat. Dennoch wissen wir wegen des Ansprechen des Detektors, dass der obere Lichtweg (durch das Knallgas) unterbrochen war. Folgerung: Die Ampulle war gefüllt. Man rettet somit zerstörungsfrei die Hälfte der Produktion.

### Tunneleffekt

Es gab mal einen niedlichen Film mit Heinz Rühmann, in dem er durch die Wand gehen konnte. Beim Tunneleffekt gehen Quantenobjekte durch eine Wand, aber im Gegensatz zu Heinz Rühmann können sie hinterher auf beiden Seiten der Wand sein. Den Effekt entdeckte bereits 1897 Robert Williams Wood, allerdings konnte er ihn nicht erklären.

Als Telefonieren noch auf kupfernen Kabeln passierte, konnte man manchmal den Effekt des „Übersprechens“ beobachten: Man hörte auf der eigenen Leitung ganz leise ein Gespräch mit, das auf einer Nachbarleitung geführt wurde. Die elektrischen Schwingungen einer Leitung überwinden die Isolation des Kabels und erschienen in der Leitung nebenan. Das kann sogar bei Glasfaserkabeln passieren, und dann ist es tatsächlich der Tunneleffekt. Das Licht überwindet die Ummantelung der Glasfaser und kommt zu einem Teil in der Nachbarleitung zum Vorschein. Das liegt daran, dass die Zustandsfunktion  $\Psi$  an der Grenze nicht schlagartig auf Null geht, sondern in der Wandung noch allmählich abklingt. Ist die Wand nicht allzu dick, kommt ein Teil auf der anderen Seite heraus, als ob es einen geheimen Tunnel gäbe.

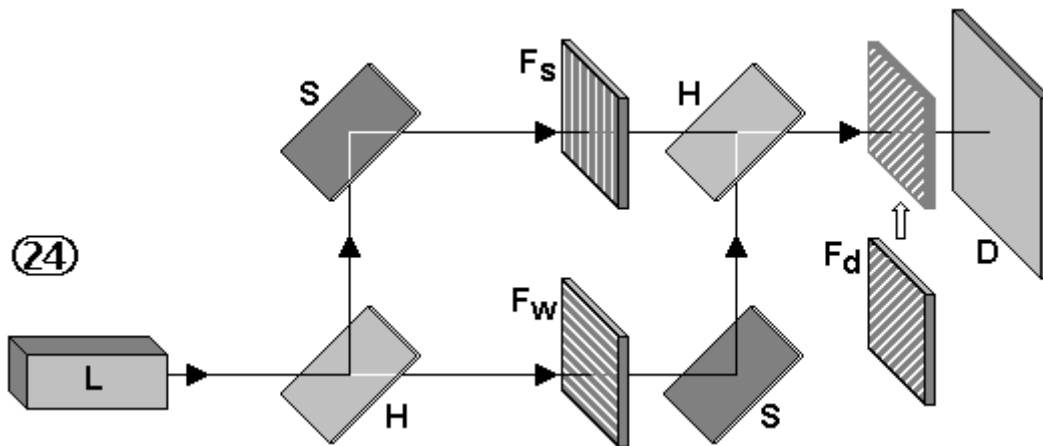
Stellt euch das am besten wie die Spiegelung von Licht an einer Fensterscheibe vor. Ein Teil des Lichtes geht durch, und ein anderer Teil wird reflektiert. Für ein einzelnes Lichtquant, das auf die Scheibe trifft, bedeutet das, dass es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit hindurch geht und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zurückkommt. Erst ein Detektor bringt Gewissheit. Die Zustandsfunktion kollabiert, und das Photon wird entweder vor oder hinter der Scheibe gefunden.



Im Bild 23 habe ich das mal vereinfacht dargestellt (Vergleiche Bild 1, falls ihr den Link noch findet). Oben: Das Photon auf dem Hinweg zur Scheibe. Unten: Nach der Begegnung mit der Scheibe. Ein Teil fliegt weiter, ein Teil kommt zurück. Die Wahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  teilt sich auf, ist aber in der Summe logischerweise immer noch 100 Prozent. Nach dem Kollaps ist das Photon dann natürlich nur noch auf einer Seite gemessen worden. Das obige Bild könnt ihr im Grunde auf jeden Versuch anwenden, bei dem Licht sich aufteilt: Doppelspalt, Kalkspat, Strahlteiler...: Ein Wahrscheinlichkeitspaket  $|\Psi|^2$  kommt an, zwei (kleinere) laufen weiter.

### Quantenradierer

Ich hatte euch vorhin erzählt, dass die *Androhung* einer Lokalisierung auf oben oder unten bereits den Zustand kollabieren lässt. Aber es kommt noch krasser: Man kann den Kollaps rückgängig machen, wenn man die Drohung wieder fallen lässt. Das funktioniert etwa wie folgt (Bild 24):



In den einen Lichtweg eines des Interferometers wird ein senkrecht polarisiertes Filter  $F_s$  eingesetzt, in den anderen ein waagrecht polarisiertes  $F_w$ . Die Photonen, die am Detektor eintreffen, sind jetzt markiert, man könnte an ihrer Polarisation erkennen, welchen Weg sie genommen haben. Natürlich lassen sie sich das nicht bieten, das Interferenzmuster verschwindet, denn es ist eine gemischte Gesamtheit aus Photonen im oberen und Photonen im unteren Weg entstanden. Man kann sie aber besänftigen, indem man vor dem Detektor ein weiteres Filter  $F_d$  einsetzt, diesmal diagonal (schräg) polarisiert.

Dadurch wird die Markierung ausradiert, die Photonen vergessen, dass sie markiert waren und nehmen einheitlich schräge Polarisation und damit wieder einen reinen Zustand an. Das Interferenzmuster erscheint wieder, als ob die Zustandsfunktion nie kollabiert gewesen wäre.

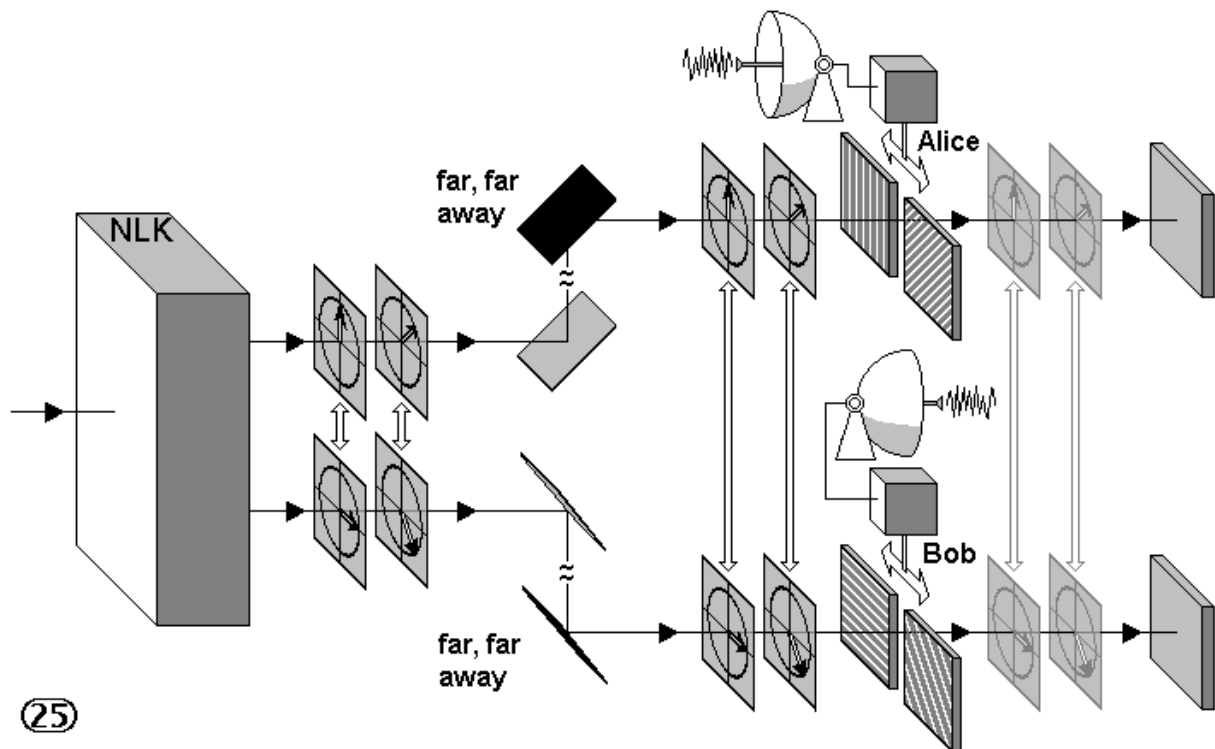
### **Die letzte Bastion der Lokalität**

Wie oben schon erwähnt, muss sich seriöse Wissenschaft auch um abwegig erscheinende Möglichkeiten kümmern.

Ihr erinnert euch an das Experiment mit verschränkten Lichtquanten: Alice und Bob wählen zufällig eine Messrichtung (waagrecht/senkrecht oder diagonal). Das gemessene Quant ist Teil eines Gesamtzustandes, der durch die Messung insgesamt kollabiert, sodass eine Messung senkrechter Polarisation bei Alice notwendig eine unter  $90^\circ$  dazu stehende Polarisation bei Bob zur Folge hat, sollte er sich für diese Richtung entscheiden. Ebenso hat schräge Polarisation ( $45^\circ$ ) bei Alice schräge Polarisation ( $135^\circ$ ) bei Bob zur Konsequenz. Sollten sie in unterschiedlicher Orientierung messen, so ist das Ergebnis hingegen beliebig.

Wenn man pingelig ist, kann man einwenden, dass die zufällige Wahl der Messrichtung möglicherweise doch nicht zufällig ist, dass die beiden Quanten also doch einen Informationsvorsprung haben könnten. Beim Aufbau des Experimentes besteht die theoretische Chance, dass die geplante Stellung des Filters bei Alice bereits vor dem Experiment an Bob geleakt wurde. Wenn Alice und Bob die Wahl etwa einem Computer überlassen, der eine Zufallszahl erzeugt, könnte der Algorithmus der beiden Computer wissen, welche Filterstellung die nächste ist, und noch ehe die verschränkten Quanten starten, wissen sie bereits, auf welche Messung sie sich vorbereiten müssen. Natürlich ist das eine gewagte Gedankenkonstruktion, um die Lokalität zu retten, beinahe als hätte man eine telepathische Verständigung vorgeschlagen. Trotzdem: man muss das prüfen.

Anton Zeilinger hat vorgeschlagen, die Einstellung der Messfilter erst im letzten Moment vor dem Eintreffen der Lichtquanten einem über jeden Verdacht erhabenen Zufallsgenerator zu überlassen. Dazu werden Signale in entgegengesetzter Richtung am Himmel stehender Radioquellen verwendet, die sich in Milliarden Lichtjahren Entfernung befinden. Deren Signale sind also Milliarden Jahre vor dem Experiment auf den Weg gegangen und können absolut nichts voneinander wissen (Bild 25).



(25)

Folglich können auch die Quanten nicht wissen, welche Messung ihnen bevorsteht. Trotzdem liefern sie bei Alice und Bob aufeinander senkrecht stehende Polarisationsrichtungen. Sie bleiben verschränkt bis zum Kollaps, da kann man nichts machen. Die Welt ist nichtlokal!

Hey, das bedeutet nicht wie in der New Age-Romantik, dass in dieser Welt alles mit allem verbunden ist. Unter der Überschrift „Dekohärenz“ habe ich euch erzählt, dass man zur Aufrechterhaltung eines reinen Zustandes einen riesigen Aufwand treiben muss. Das meiste in der Welt ist daher (beruhigenderweise) *nicht* verschränkt.

Einstein, der zeitlebens die Nichtlokalität ablehnte und auf eine Lösung mit verborgenen Parametern hoffte, soll gesagt haben: „Gott würfelt nicht!“ Der Legende nach hat Bohr ihm darauf geantwortet: „Hören Sie auf, Gott Vorschriften zu machen.“

Vermutlich könnte die Welt, wie wir sie kennen, nicht so aussehen, wie wir sie kennen, wenn nicht tief unten an der Basis, die nur Gott kennt, eine uns so abstrus erscheinende Quantenphysik wirken würde. Und vergessen wir nicht, dass wir dieser Quantenphysik technische Wunder wie Laser, Halbleitertechnik oder Magnetresonanztomografie verdanken.

Zum Abschluss einen Witz gefällig? Schrödinger, Heisenberg und Einstein fahren im Auto. Ein Polizist hält sie an: „Sie sind unerlaubte 130 km/h gefahren.“ Darauf Heisenberg: „Mist, jetzt weiß ich nicht mehr, wo ich bin.“ Der Polizist: „Was haben Sie im Kofferraum?“ Schrödinger: „Eine Katze.“ Der Polizist sieht nach und stellt fest: „Die Katze ist ja tot.“ „Tja“, macht Schrödinger, „jetzt schon.“ „Es hilft nichts“, sagt der Polizist, „ich muss einen von Ihnen zur Wache mitnehmen.“ Darauf Einstein: „Lasst uns würfeln, wer geht.“

Okay, ich habe nicht behauptet, dass der zum Lachen ist.

**ENDE**

Literaturverzeichnis? Hat da jemand Literaturverzeichnis gesagt? Leute, das ist nicht euer Ernst. Das hier ist ein Clubmagazin und keine wissenschaftliche Fachzeitschrift. Aber schön, wenn jemand unbedingt ein Literaturverzeichnis haben möchte, bitte sehr:

## Literatur

- J. S. Bell: „Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics“, Cambridge University Press, Cambridge 1987
- J. S. Bell: Physics 1 (1964) 195
- C. H. Bennet, G. Brassard, A. K. Ekert: „Quanten-Kryptographie“ in Spektrum 12/1992
- D. Bohm: Phys. Rev. 85 (1952) 166
- J. F. Clauser, M. A. Horne: Phys. Rev. D10 (1974) 526
- F. Crick, C. Koch: „Das Problem des Bewusstseins“ in Spektrum 11/1992
- A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: Phys. Rev. 47 (1935) 777
- H. Everett: Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 454
- C. Ferrie: „Quanten Bullshit“, Franckh-Kosmos, Stuttgart 2024
- A. Flew: „A Dictionary of Philosophy“, St. Martin's Press, New York 1984
- M. Gell-Mann in „The Nature of Physical World“, Hrsg. Huff & Prewett, Wiley, New York 1979
- G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Webber: Phys. Rev. D34 (1986) 470
- D. Griffin: „Physics and the Ultimate Significance of Time“, State University of New York Press, New York 1986
- W. Heisenberg: „Physik und Philosophie“, Ullstein, Frankfurt a. M. 1977
- T. Honderich: „A Theory of Determinism“, Oxford University Press, Oxford 1988
- J. Horgan: „Quanten-Philosophie“ in Spektrum 9/1992
- I. Kant: „Kritik der reinen Vernunft“, Meiner, Hamburg 1993
- W. Kuhn: „Die Idee der Komplementarität“ in PdNPh 7/34 (1985) 12
- S. Malin: „Dr. Bertlmanns Socken – Wie die Quantenphysik unser Weltbild verändert“, Reclam, Leipzig 2003
- J. v. Neumann: „Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik“, Springer, Berlin 1934
- P. Pearle: Phys. Rev. D13 (1976) 857
- H. Reichenbach: „Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik und Wahrscheinlichkeit“, Vieweg, Braunschweig 1989
- J. Searle: „Minds, Brains and Science“, BBC, London 1984
- F. Selleri: „Die Debatte um die Quantentheorie“, Vieweg, Braunschweig 1990
- E. Squires: „Conscious Mind in the Physical World“, Adam Hilger, New York, 1990
- H. Vogel: „Zum philosophischen Wirken Max Plancks“, Akademie-Verlag, Berlin 1961
- R. W. Wood: Phys. Rev. 5 (1897) 1
- A. Zeilinger: „Einsteins Spuk“, Goldmann, München 2007