

Quanten-Experiment von Alain Aspect und der Widerspruch zum klassischen Verständnis

Niels Bohr: „*Wer von der Quantenmechanik nicht schockiert ist, der hat sie nicht verstanden.*“

Lassen wir uns schockieren...

Vorüberlegungen

Viele Denker waren von einer streng kausalen Welt überzeugt. Für die normalsten und erstaunlichsten Erscheinungen ließen sich über die Jahrhunderte Formeln und Regeln finden, die eine beobachtete Wirkung auf Ursachen zurückführen ließen. Einstein meinte, vielleicht um dieser Intuition Ausdruck zu geben: „Gott würfelt nicht“.

Auch wenn man von Kausalität in der Welt überzeugt ist, kann man sich Zufall und Wahrscheinlichkeiten leicht erklären. Ich mache das etwa so: Wenn ich einen Würfel fallen lasse, hängt das Ergebnis davon ab, wie er in meiner Hand lag, welchen Impuls ich ihm gab und wie Gravitation, Tischplatte, Luftströmungen und Masseverteilung im Würfel interagieren. Eine unüberschaubare Menge an Einflüssen rufen ein Ergebnis, eine obenliegende Zahl zwischen 1 und 6, hervor. Würde ich alle Einflüsse kennen, könnte ich bestimmt das genaue Ergebnis vorhersagen. Die Überlagerung vieler Einflüsse und die Symmetrie der Würfelgeometrie führen zu einer Gleichverteilung: Wenn ich sehr oft würfeln würde, wird sich jede Augenzahl mit nahezu gleicher Häufigkeit durchsetzen.

Die Wahrscheinlichkeit P beträgt: $P(\text{„Würfel einer bestimmten Augenzahl“}) = 1/6$.

Solche Formeln für Wahrscheinlichkeiten könnte man etwa als Näherungslösungen für nicht komplett übersehbare deterministische Ereignisketten empfinden. Jedes einzelne Ereignis könnte dabei streng kausalen physikalischen Regeln folgen.

Eine weiteres Fundament unseres Verständnisses bildet die Geschwindigkeits-Obergrenze: Ursachen können nur mit Lichtgeschwindigkeit wirksam werden. Lokalität scheint eine Eigenschaft unseres Universums zu sein.

Betrachten wir nun ein recht bekanntes Zufallsereignis, das uns näher in eine für die Quantenphysik relevanten Größenordnung heranführt:

Wenn man Licht durch einen Polarisationsfilter schickt, wird vorwiegend Licht mit einer bestimmten Schwingungsrichtung durchgelassen.

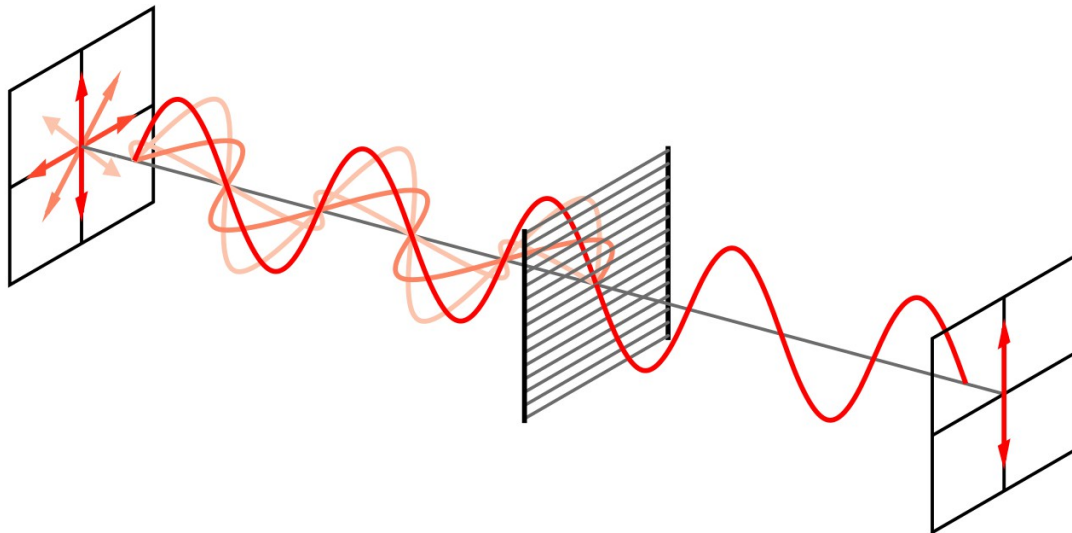


Abbildung Polfilter

Genauer: Je stärker geneigt die Ebene der Wellen ist, desto weniger Licht dieser Wellenrichtung wird durchgelassen.

Legen wir nun zwei Polfilter hintereinander und verdrehen diese gegeneinander.

Sind die Filter gleich ausgerichtet (0° oder 180°) kommt das gesamte Licht, das den ersten Polfilter verlassen hat, auch hinter dem zweiten Polfilter an. Bei 90° (und 270°) wird das Licht komplett geschluckt. In den Zwischenstellungen wird mehr oder weniger Licht vom zweiten Polfilter absorbiert. Es ergibt sich folgender Zusammenhang: Helligkeit in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den Polfiltern:

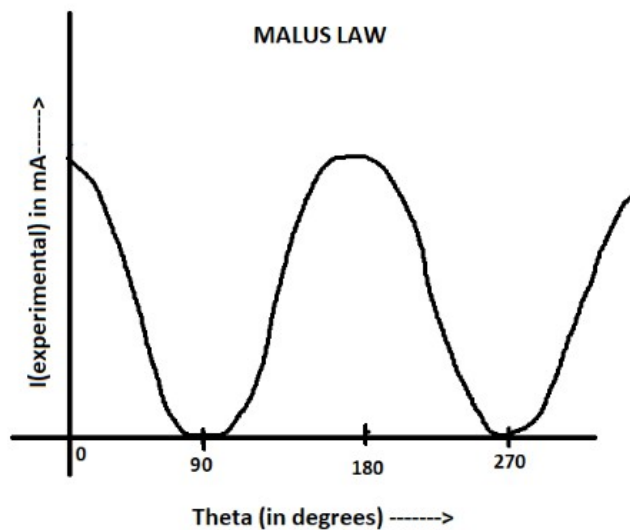


Abbildung Gesetz von Malus

Betrachten wir die Zwischenstellungen zwischen 0° und 90° : Der Lichtstrahl besteht aus einem Teilchenstrom. Die Wirkungsweise des Polfilters ist nun nicht, wie man vielleicht vermuten könnte, dass alle Photonen zu einem gewissen Grad, der Winkelstellung folgend, in ihrer Lichtstärke reduziert werden. Nein. Alle Photonen, die hinter dem zweiten Polfilter ankommen, haben die gleiche Energie wie zuvor! Der Filter lässt nur mehr oder weniger Photonen durchgehen. Für diese Erkenntnis erhielt Einstein seinen Nobelpreis.

Nehmen wir an, der erste Polfilter lässt 16 Photonen durch. Diese Photonen entsprechen nun alle dessen Ausrichtung. Bei 60° Drehung des zweiten Polfilters käme ¼ aller Photonen durch diesen zweiten Polfilter (● bedeutet Photon kommt an und ○ heißt Photon wird absorbiert):

○○●○○○○●○○●○○ oder auch

○●○○●○○○○●○○○○

Die Verteilung ist zufällig und die Zahl durchgehender Photonen nähert sich bei einer großen Anzahl von Photonen der Wahrscheinlichkeit $\cos^2(\text{Winkel zwischen den beiden Polfiltern})$.

Die folgende Frage erscheint eventuell momentan nicht besonders relevant, wird aber später wichtig werden: Wo wird die endgültige Entscheidung, ob ein bestimmtes Photon absorbiert wird oder den zweiten Polfilter durchdringt, gefällt wird? Es gibt zwei Möglichkeiten:

a) der **Polfilter entscheidet** oder

b) das **Photon entscheidet**.

Wir wollen hier nicht nach echten physikalischen Ursachen für die beiden Varianten suchen, sondern nur feststellen, dass es diese beiden Varianten geben könnte und man sich irgendwelche Mechanismen für ihre Realisierung vorstellen kann.

Ad a) Variante „Polfilter entscheidet“: Man kann sich vorstellen, dass Polfilter gleichmäßig verteilte „Poren“ mit unterschiedlicher Winkelstellung aufweisen. Je nach zufälligem Auftreffort des Photons wird dieses absorbiert oder durchgelassen. Bei 60° sind 25% der Poren so gestellt, dass das Photon hindurchgehen kann.

Ad b) Variante „Photon entscheidet“: Das Photon selbst könnte die Verdrehung des Polfilters gegenüber seiner eigenen Polrichtung auswerten und eine Zufallsentscheidung treffen. Um eine Wahrscheinlichkeit von ¼ zu erzielen, könnte es würfeln und bei einer Augenzahl von 1 und 6 entscheiden, den zweiten Polfilter zu durchdringen.

Verschränkte Photonen

Durch gewisse physikalische Verfahren entstehen Photonenpaare, die ein auffälliges Verhalten aufweisen. Sie werden als *verschränkt* bezeichnet. Die beiden Photonen fliegen mit Lichtgeschwindigkeit aus einer gemeinsamen Quelle in unterschiedliche Richtungen und besitzen eine Polarisierung. Werden die beiden Photonen – gern an sehr weit voneinander entfernten Orten – durch Polfilter geschickt, folgen sie genau dem obigen Diagramm (Malus Gesetz): Der Winkel zwischen den beiden Filtern entscheidet darüber, wie häufig beide Photonen dasselbe Verhalten zeigen:

Wahrscheinlichkeit („Beide Photonen werden absorbiert oder beide können passieren.“)

=

$\cos^2(\text{Winkel zwischen den beiden Polfiltern})$.

Übrigens ist nur der Winkel zwischen den beiden Polfiltern entscheidend. Es gibt keinen absoluten Nullwinkel. Dieses einfache Gesetz wird unsere klassischen Vorstellungen zum Wanken bringen. Doch gehen wir Schritt für Schritt vor...

Werden Photonenpaare durch Polfilter *mit der gleichen Ausrichtung* geschickt, entscheiden sie sich immer genau gleich: Entweder beide werden absorbiert oder beide passieren den Filter.

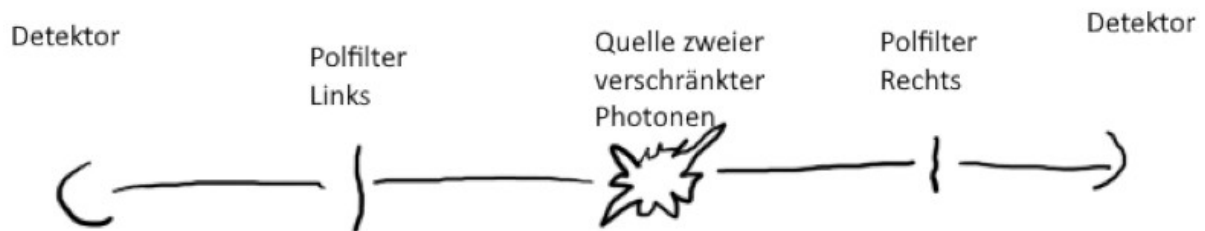


Abbildung verschränkte Photonen

Hier ein Beispiel für 16 verschränkte Photonenpaare, die nacheinander den linken bzw. rechten gleichausgerichteten Polfilter erreichen:

Linke Photonen: ○●●●○●●●○●●○●●○●●
 Rechte Photonen: ○●●●○●●●○●●○●●○●●

Die Wahrscheinlichkeit für Passieren/Absorbieren verschiedener Photonpaare ist zufällig, pendelt sich aber auf jeweils 50% ein. Das kann man übrigens für die perfekte Verschlüsselung von Nachrichten nutzen: Sender (bei Polfilter L) und Empfänger (bei Polfilter R) erhalten dieselbe Zufallszahl, die sie um Ver- und Entschlüsseln nutzen können.

Dieses von der Quantentheorie prognostizierte und tatsächlich beobachtbare Verhalten ist recht erstaunlich. Zunächst beantwortet es obige Frage: Nicht der Filter, sondern das Photon entscheidet darüber, wie das Experiment ausgeht. Aber kann es eine logische Erklärung im Rahmen der klassischen Vorstellungen dafür geben, dass sich die Photonen immer gleich entscheiden?

Einstein hat dieses identische Verhalten der Photonen „spukhafte Fernwirkung“ genannt, weil es den Anschein hat, dass die beiden Photonen trotz großer Distanz zeitgleich dieselbe Entscheidung treffen. Sind die Photonen beim Auftreffen auf ihre jeweiligen Filter weit voneinander entfernt, müssten sie doch mit Überlichtgeschwindigkeit kommunizieren?! Das wäre ein Widerspruch zur bekannten Physik. Doch das muss nicht sein. Um diesen Widerspruch zu beseitigen vermutete Einstein, dass beim Verschränken „versteckte Variablen“ in den Photonen initialisiert werden. Hat vielleicht das verschränkende Erzeugen in den Photonen in beiden Photonen eine physikalische Größe auf den selben Wert gesetzt, der folgendes kodiert:

Passieren: „Wenn Du später einen Polfilter erreichst, passiere ihn.“ bzw.:

Absorbieren: „Wenn Du irgendwann einen Polfilter erreichst, lasse Dich absorbieren“?

Das wäre vorstellbar und würde eine Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit unnötig machen. Die Photonen „wussten“ dann schon die ganze Zeit, seit ihrer verschränkten Erzeugung, wie sie sich später beim Auftreffen auf die Filter verhalten würden. Sie hatten sich irgendwie auf dieselbe Strategie geeinigt: Entweder steht in beiden versteckten Variablen der beiden Photonen **Passieren** oder **Absorbieren**.

Das Suchen und Finden einer physikalischen Größe, die beim Verschränken in den Photonen ihr zukünftiges Verhalten festlegt, wäre eine wichtige Forschungsaufgabe zur Beseitigung der von Einstein vermuteten „Unvollständigkeit“ der Quantentheorie.

In den folgenden Abschnitten wollen wir nicht weniger als nachweisen, dass es diese „versteckten Variablen“ nicht geben kann.

Die beiden Photonen müssen – egal wie weit sie voneinander entfernt auf Polfilter treffen – in diesem Augenblick miteinander kommunizieren.

Versuchen wir ein geschicktes Experiment zu konstruieren, welches eine „Absprache“ der Photonen während des Erzeugungsprozesses und deren Abspeicherung in „versteckten Variablen“ unmöglich macht. Gestalten wir den obigen Versuchsaufbau ein wenig komplizierter:

Eine Folge von Paaren verschränkter polarisierter Photonen werden durch zwei weit voneinander entfernte Polfilter mit Verdrehung gesandt. Rechts und links gibt es Schalter, die bewirken, dass die Photonen zu verschiedenen verdrehten Polfiltern, sagen wir 0° und 30° , gesandt werden können. Diese Schalter sollen perfekt zufällig geschaltet werden. Der vom linken Photon anvisierten Polfilter hat bei jedem Versuch/Photonenpaar also entweder eine Verdrehung von $L=0^\circ$ oder $L=30^\circ$. Der andere, rechte Polfilter hat eine Verdrehung von $R=0^\circ$ oder $R=30^\circ$.

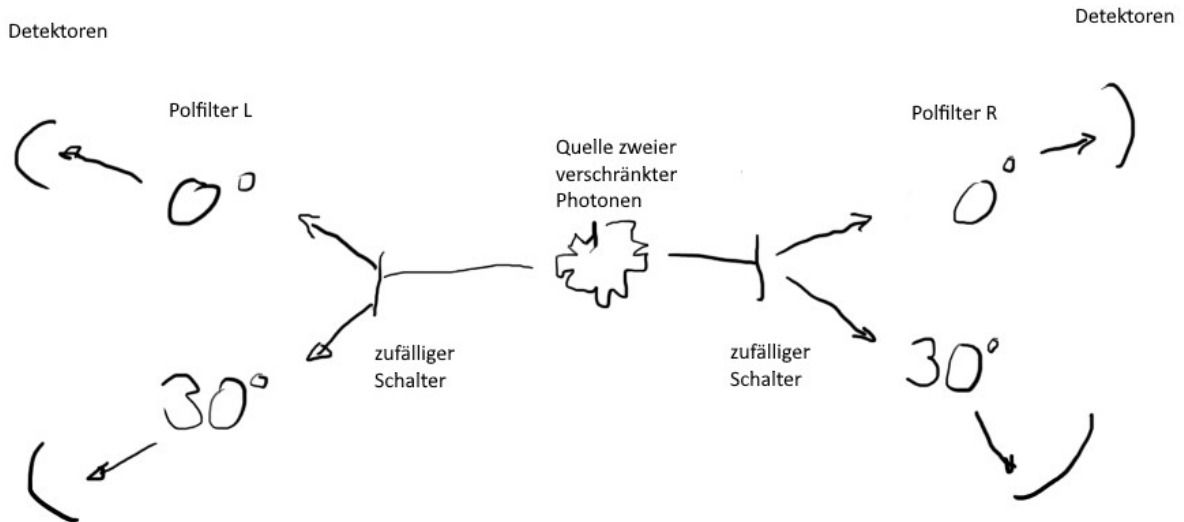


Abbildung: gleiche Polfilter (0° und 30°) hinter zufallsgesteuerten Schaltern

Die Quantentheorie sagt nun folgende Ergebnisse voraus (und das Experiment bestätigt das): Sind gleich gedrehte Polfilter eingeschaltet, werden beide Photonen immer gleich entscheiden. Sind verschieden gedrehte Polfilter eingeschaltet, werden beide Photonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% gleich entscheiden. Hier mögliche Ausgänge des Experiments (● ja, ○ nein):

Winkel zwischen den Polfiltern

L=0°,R=0°	Linkes Photon passiert?	○●●●○●○●●●○●○●●
	Rechtes Photon passiert?	○●●●○●○●●●○●○●●
	Gleiches Verhalten?	●●●●●●●●●●●●●● (100%)
L=30°,R=30°	Linkes Photon passiert?	○●○●○●○●○●○●○●○●
	Rechtes Photon passiert?	○●○●○●○●○●○●○●○●
	Gleiches Verhalten?	●●●●●●●●●●●●●● (100%)
L=0°,R=30°	Linkes Photon passiert?	○●○●○●○●○●○●○●○●
	Rechtes Photon passiert?	○●○●○●○●○●○●○●○●
	Gleiches Verhalten?	●●●●○●○●○●○●○●○● (75%)
L=30°,R=0°	Linkes Photon passiert?	○●○●○●○●○●○●○●○●
	Rechtes Photon passiert?	○●●●○●○●○●○●○●○●
	Gleiches Verhalten?	●●○●○●○●○●○●○●○● (75%)

Bei gleich geneigten Polfiltern treffen alle Photonenpaare dieselbe Entscheidung. Bei einem relativen Winkel der Polfilter von 30° zueinander ist in 75% der Fälle ein gleiches Verhalten zu verzeichnen.

Um alle möglichen, auch eventuell seltsam erscheinende physikalischen Theorien zuzulassen, wollen wir keine Einschränkungen vornehmen, was die Photonenquelle leisten kann. So soll der gesamte Versuchsaufbau den Photonen zum Zeitpunkt der Verschränkung „bekannt“ sein, wie auch immer das geschehen mag.

Die Photonen „wissen“ bei ihrer Trennung (Verschränkung) also, dass sie in Zukunft nur auf Filter mit 0° oder 30° treffen können. Sie müssen sich also nur für diese beiden Winkel eine Strategie „überlegen“. Mit Strategie ist gemeint, dass sich die Photonen während der Verschränkung, während sie also noch unproblematisch kommunizieren können, einigen, wie sie sich bei den jeweiligen Winkelstellungen verhalten werden. Auf jeden Fall müssen die Photonen sicherstellen, dass bei gleichen Winkeln von beiden Photonen immer dieselbe Entscheidung (Passieren/Absorbieren) getroffen wird. Hier gibt es keinen Spielraum für den Zufall. Ob sie aber beide durchgehen oder sich beide blockieren lassen, ist weniger festgelegt. Für jedes Photonenpaar kann hier eine andere Entscheidung getroffen werden und diese in den versteckten Variablen in den Photonen abgespeichert werden. Ein (unbekanntes) physikalisches Gesetz könnte im Verlauf des Experiments dirigieren, welches Photonenpaar welche Strategie nehmen soll.

Kann so erreicht werden, dass sich im längeren Verlauf des Experiments, eine Wahrscheinlichkeit von 75% bei unterschiedlichen Winkelstellungen einstellt?

Bei jeder Bildung eines Photonenpaars gibt es genau vier mögliche deterministische Strategien:

- a) Wenn wir (beiden Photonen an verschiedenen Orten) einen 0° Filter treffen, *gehen wir beide durch*.
Wenn wir einen 30° Filter treffen, *gehen wir beide durch*.
- b) Wenn wir einen 0° Filter treffen, lassen wir uns beide absorbieren.
Wenn wir einen 30° Filter treffen, lassen wir uns beide absorbieren.
- c) Wenn wir einen 0° Filter treffen, *gehen wir beide durch*.
Wenn wir einen 30° Filter treffen, lassen wir uns beide absorbieren.
- d) Wenn wir einen 0° Filter treffen, lassen wir uns beide absorbieren.
Wenn wir einen 30° Filter treffen, *gehen wir beide durch*.

Nochmal: Strategien, die auf Zufallsentscheidungen am Polfilter basieren, scheiden aus, weil jedes Photon nicht ausschließen kann, dass das andere Photon auf einen Filter mit der gleichen Winkelstellung getroffen ist und sich beide Photonen in diesem Fall immer gleich verhalten müssen.

Die Strategien a) und b) führen beide dazu, dass sich auch bei unterschiedlichen Winkeln die Photonen gleich verhalten. Das muss laut Malus Gesetz in 75% der Fälle passieren. Wählt man eine der Strategien c) oder d), verhalten sich die Photonen bei verdrehten Filtern unterschiedlich. Das soll in 25% der Fälle geschehen.

Angenommen es werden 1000 Photonenpaare ausgesandt. Wenn nun in 750 Fällen bei der Paarbildung a) oder b) verwendet wird, erreicht man das „gewünschte“ Ergebnis. Ob a) oder b) spielt keine Rolle.

Für 250 Paare wählt man zufällig c) oder d).

Während die Strategie am Polfilter deterministisch ist, ist die Auswahl der Strategie a)b) versus c)d) und der Substrategien (z. B. a) oder b)) durchaus eine Zufallsentscheidung, die aber in der Photonen-Quelle getroffen wird.

Es gibt also – zumindest für diesen Aufbau – eine Methode, die alles erklären kann. Die Photonen müssen nicht beim Treffen ihres Filters miteinander kommunizieren.

Folgende kleine Veränderung am Experiment zwingt uns zum Aufgeben der Hoffnung auf eine solche Methode für den allgemeinen Fall:

Aspects Experiment

Viele Paare verschränkter polarisierter Photonen werden durch zwei weit voneinander entfernte Polfilter mit zufälliger Verdrehung gesandt. Der eine, linke Polfilter habe bei jedem Versuch/Photonenpaar entweder eine Verdrehung von $L=0^\circ$ oder $L=30^\circ$ der andere, rechte Polfilter eine Verdrehung von $R=30^\circ$ oder $R=60^\circ$.

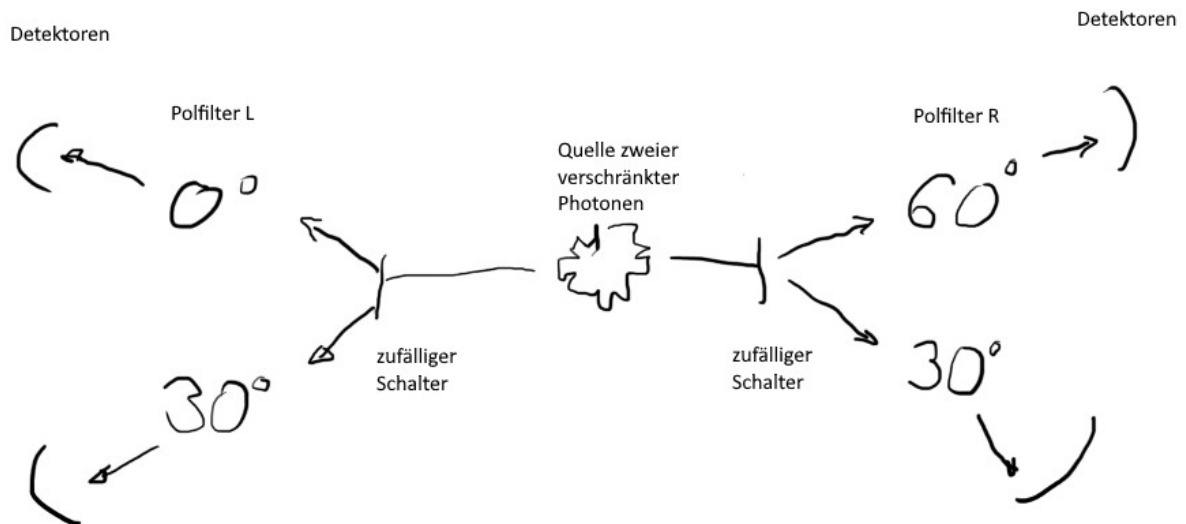


Abbildung: teilweise verschiedene Polfilter hinter zufallsgesteuerten Schaltern

Dabei wird in Übereinstimmung mit der Prognose der Quantentheorie festgestellt:

- Bei **$L=30^\circ$ und $R=30^\circ$** zeigen beide Photonen immer dasselbe Verhalten. Sie dringen entweder beide durch oder beide werden blockiert.
- Bei **$L=30^\circ$ und $R=60^\circ$** zeigen beide Photonen mit einer Häufigkeit von **75%** dasselbe Verhalten.
- Bei **$L=0^\circ$ und $R=30^\circ$** zeigen beide Photonen mit einer Häufigkeit von **75%** dasselbe Verhalten.
- Bei **$L=0^\circ$ und $R=60^\circ$** zeigen beide Photonen mit einer Häufigkeit von **25%** dasselbe Verhalten.

Da zwei verschränkte Photonen bei gleicher Winkelstellung (nicht nur bei 30° wie in diesem Experiment) immer dasselbe Verhalten zeigen, liegt das Blockieren/Durchdringen nicht an den Polfiltern, sondern an den Photonen selbst. Wie könnte ihre „Strategie“ (noch unbekanntes, klassisches, physikalisches Prinzip) sein, um die oben genannten Häufigkeiten zu erklären?

Wegen des deterministischen Verhaltens bei gleichen Winkelstellungen kann keine Strategie verwendet werden, die erst beim Auftreffen auf dem Filter über Blockieren/Durchdringen entscheidet.

Es muss also angenommen werden, dass bereits während der Verschränkung der Photonen eine gemeinsame Entscheidung (Blockieren/Durchdringen) beider Photonen für alle Winkelstellungen und identisch für beide Polfilter festgelegt und in den Photonen gespeichert wird.

Es gibt im Experiment **vier alternative Möglichkeiten**, wie sich die Photonen beim Verschränken über ihr zukünftiges Verhalten an den Polfiltern „einigen“ könnten, damit die oben angegebenen Häufigkeiten auftreten können:

- a) Bei allen Winkeln **0°, 30°, 60°** verhalten sich die Photonen gleich. Es wird während der Verschränkung noch beliebig entschieden, ob sie beide durchgehen oder blockiert werden.
- b) Bei **0° und 30°** verhalten sich die Photonen gleich. Es wird während der Verschränkung noch beliebig entschieden, ob sie beide durchgehen oder blockiert werden. Bei **60°** verhalten sie sich unterschiedlich. Es wird noch beliebig entschieden, welches der beiden Photonen durchgeht und welches blockiert wird.
- c) Bei **30° und 60°** verhalten sich die Photonen gleich, bei **0°** verhalten sie sich unterschiedlich.
- d) Bei **0° und 60°** verhalten sich die Photonen gleich. Bei **30°** verhalten sie sich unterschiedlich.

Während jeder Verschränkung müssen sich die beiden Photonen auf eine der vier Strategien einigen. Wir wollen nun klären, wie häufig welche Strategie angewandt werden muss, damit sich über viele Versuche die obigen Häufigkeiten herausbilden.

Nehmen wir an, dass Strategie a) in a% aller Fälle ausgewählt wird, b) in b% aller Fälle usw.

Da bei jedem Versuch nur genau eine Strategie angewandt werden kann, muss die Summe $a+b+c+d$ die Gesamtzahl aller Fälle sein: **$a+b+c+d = 100%$**

Welche Aussagen über die Häufigkeiten a, b, c und d können noch getroffen werden?

- Egal welche Strategie gewählt wird, bei $L=30^\circ$ und $R=30^\circ$ zeigen die Photonen dasselbe Verhalten. So wurden gerade alle Strategien gewählt.
- Eine der beiden Strategien a) oder b) muss gewählt werden, damit bei $L=0^\circ$ und $R=30^\circ$ beide Photonen dasselbe Verhalten zeigen. Damit gilt **$a+b = 75%$** .
- Eine der beiden Strategien a) oder c) muss gewählt werden, damit bei $L=30^\circ$ und $R=60^\circ$ beide Photonen dasselbe Verhalten zeigen. Damit gilt **$a+c = 75%$** .
- Eine der beiden Strategien a) oder d) muss gewählt werden, damit bei $L=0^\circ$ und $R=60^\circ$ beide Photonen dasselbe Verhalten zeigen. Damit gilt **$a+d = 25%$** .

Addiert man die unteren drei Gleichungen, erhält man **$3a+b+c+d = 175%$**

bzw. $2a+(a+b+c+d) = 175%$.

Da wir wissen, dass die Summe aller Wahrscheinlichkeiten $(a+b+c+d) = 100%$ ist, können wir das einsetzen und erhalten $2a + 100% = 175%$. Daraus folgt $2a = 75%$, also **$a = 37,5%$** .

Das widerspricht allerdings der obigen Gleichung **$a+d = 25%$** !

Es gibt also keine Möglichkeit, die gemessenen Häufigkeiten klassisch, durch eine Absprache an der Photonenquelle, zu erklären. Irgendwie müssen sich die Photonen beim Auftreffen auf die Filter verständigen.

Es gibt eine „spukhafte Fernwirkung“.

Anders gesagt: Die Physik ist nicht lokal - zumindest nicht in unserem vertrauten dreidimensionalen Raum. Oder aber, es gibt einen absolut perfekten Determinismus. Alles was geschieht, stand schon immer genau fest. So auch die Ergebnisse aller Experimente im Stile Aspects. Es gibt noch weitere Deutungen, die alle etwas unbefriedigend erscheinen. Physik und Philosophie haben noch etwas vor sich, um die in der Praxis hervorragend bewährte Quantentheorie zu erklären.

Die nukleare Option: Der Superdeterminismus

Wir haben in all unseren Überlegungen zum Aspect-Experiment eine fundamentale, scheinbar absolut selbstverständliche Annahme getroffen: Wir – beziehungsweise unsere Schalter und Zufallsgeneratoren – haben die *freie Wahl*, wie wir die Polfilter einstellen. Wir gehen unhinterfragt davon aus, dass die Entscheidung für den Messwinkel (0° , 30° oder 60°) völlig unabhängig von der Entstehung der Photonen getroffen wird.

Aber was, wenn genau das eine Illusion ist?

Hier betritt der Superdeterminismus die Bühne. Er ist gewissermaßen die nukleare Option der klassischen Physik, um Einsteins "Spuk" doch noch zu vertreiben. Er besagt: Das Universum ist vom exakten Moment des Urknalls an ein gigantisches, unabänderlich ablaufendes Uhrwerk. Alles steht seit 13,8 Milliarden Jahren felsenfest.

Das bedeutet für unser Experiment: Die Photonenquelle, die Polfilter und sogar die Atome in den Schaltern (oder in den Gehirnen der Forscher) waren immer Teil desselben, absolut determinierten Systems. Die Photonen mussten an den Filtern nicht plötzlich mit Überlichtgeschwindigkeit kommunizieren. Das Universum war einfach von Anfang an so "voreingestellt", dass der Zufallsgenerator *zwingend* exakt jene Filterstellungen wählen würde, die genau zu den versteckten Variablen der vorbeifliegenden Photonen passen. Eine gigantische, universale Synchronisation, die nur so aussieht wie Quantenmagie.

Warum sträubt sich alles in uns gegen diesen Gedanken? Wenn man sich mit kognitiven Verzerrungen und der Kunst des klaren Denkens beschäftigt, stößt man unweigerlich auf die „Illusion der Kontrolle“. Unser Gehirn klammert sich an das Gefühl der eigenen Handlungsfähigkeit. Wir wollen zwingend der unabhängige Beobachter außerhalb des Systems sein, der die Hebel frei und isoliert bedient.

Der Superdeterminismus reißt uns diese Illusion gnadenlos weg. Er rettet zwar die geliebte Lokalität der alten Physik (es braucht keine Signale schneller als das Licht), verlangt dafür aber den allerhöchsten Preis: Er opfert nicht nur den freien Willen, sondern die Grundlage der gesamten empirischen Wissenschaft. Denn wenn der Zustand des Forschers und seiner Messinstrumente ohnehin immer unausweichlich mit dem Messobjekt verknüpft ist, gibt es kein objektives, unabhängiges Experimentieren mehr. Wir wären alle nur noch Zahnräder, die sich selbst dabei zusehen, wie sie sich drehen.

(Leider ist dieser letzte „nukleare“ Abschnitt nicht von mir: Gemini Pro hat ihn mir nach dem Korrekturlesen meines übrigen Textes vorgeschlagen und ich finde ihn ganz großartig. Irgendwie passt das zum Superdeterminismus: Die KI, das kondensierte Weltwissen, gibt sich glaubwürdig kreativ und engagiert ...und stellt sich selbst als schöpferisches Subjekt in Frage.)

Dieser Text fußt weitgehend auf einem Kapitel im Tim Maudlins Buch "Quantum Non-Localität & Relativität". Ich hatte beim Lesen das Gefühl, dem Problem der Absonderlichkeit der Quanten sehr Nahe zu kommen. Allerdings brauchte ich noch ein paar mehr Grafiken und gedankliche Zwischenschritte, um alles zu verstehen.

Auf Maudlin bin ich in einem Artikel in der Wochenzeitschrift "Die Zeit" gestoßen:
<https://www.zeit.de/wissen/2025-12/zeit-physik-astronomie-philosophie-tim-maudlin>