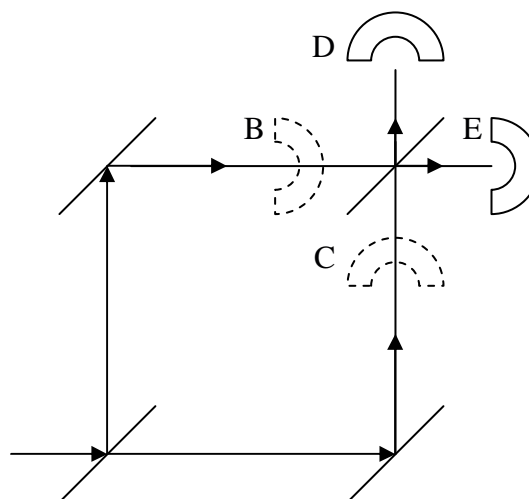


„Delayed Choice“ - Experimente und Wheelers Paradoxon

In der folgenden Arbeit geht es um die Frage, ob die Zukunft die Vergangenheit beeinflussen kann. Als Grundlage dafür wird ein sog. „delayed choice“ – Experiment vorgestellt, welches von Wheelers 1978 vorgeschlagen wurde und dessen Ausgang als Wheelers Paradoxon in die Literatur eingegangen ist. In „delayed choice“ – Experimenten geht es immer darum, eine Versuchsanordnung während einer Messung zu verändern und damit noch während des Experiments zu entscheiden, ob der Wellencharakter oder der Teilchencharakter von Licht in Betracht gezogen werden soll. Um diese Versuche und das Paradoxe daran zu verdeutlichen, wird zunächst Wheelers Gedankenexperiment vorgestellt, dann wird kurz auf die experimentelle Realisierung eingegangen um schließlich einen Lösungsversuch, der unter anderem von Griffiths vorgeschlagen wurde, kurz vorzustellen.

Ein Mach-Zehnder-Interferometer wird so präpariert, dass sich in beiden Interferometerarmen vor dem zweiten Strahlteiler Photodetektoren (B,C) befinden. Diese Detektoren können noch während der Messung, d.h. nachdem das einlaufende Photon auf den ersten Strahlteiler gefallen ist, aus den Armen entfernt werden. Hinter dem zweiten Strahlteiler befinden sich zwei weitere, fix gehaltene Detektoren (D,E). Wheeler schlug folgende Experimente vor:



- a) Man lässt ein Photon einlaufen und belässt die Photodetektoren B und C in den Armen. Dann wird an einem der beiden Detektoren, beispielsweise B, das Photon nachgewiesen. Es scheint nun vernünftig, dass sich das Photon nach dem ersten Strahlteiler im oberen Arm befunden hat.
- b) Man lässt ein Photon einlaufen, und noch bevor dieses Photon den ersten Strahlteiler passiert, entfernt man die Photodetektoren B und C aus den Armen. Man kann nun nicht sagen, in welchem Arm sich das Photon aufhält, vielmehr befindet es sich aus quantenmechanischer Sicht in einem kohärenten Überlagerungszustand zwischen beiden Interferometerarmen. Am zweiten Strahlteiler wird dieser Überlagerungszustand aufgehoben und das Photon wird an einem der beiden Photodetektoren, beispielsweise D, nachgewiesen.
- c) Man lässt ein Photon einlaufen und den ersten Strahlteiler passieren. Noch bevor das Photon an einem der Detektoren B oder C nachgewiesen werden kann, werden die Detektoren B und C aus den Armen entfernt. Somit wird das Photon schließlich an einem der beiden Detektoren, beispielsweise D, nachgewiesen.

Beim Erklärungsversuch dieser drei Experimente stößt man schließlich auf Wheelers Paradoxon: Gemäß Versuch a) muss sich das Photon, falls es später am Detektor B nachgewiesen wird, genau im oberen Arm befunden haben. Gemäß Versuch b) muss sich das Photon, falls man die Detektoren B und C aus den Armen entfernt hat, damit man es später am Detektor D nachweisen kann, sich in einem kohärenten Superpositionszustand befunden haben. Das Paradoxe tritt nun bei Versuch c) auf: Zunächst trifft das Photon auf den ersten Strahlteiler und da sich die Detektoren B und C noch in den Armen befinden, muss sich das Photon, gemäß Versuch a), seitdem es den ersten Strahlteiler passiert hat im oberen Arm befunden haben. Entfernt man nun in der Zwischenzeit die Detektoren B und C aus den Armen, so muss sich, gemäß Versuch b), das Photon, seitdem es den ersten Strahlteiler passiert hat in einem kohärenten Superpositionszustand befunden haben. Alles in allem muss somit das Photon, als es auf den ersten Strahlteiler getroffen ist, bereits über die Zukunft Bescheid „gewusst haben“, d.h. ob sich die Detektoren B und C auch nachher noch in den Armen des Interferometers befinden werden oder nicht. Es scheint somit, dass die Zukunft die Vergangenheit beeinflussen kann.

Nachdem nun anhand dieses Gedankenexperiments, welches 1978 von Wheeler vorgeschlagen wurde, das Paradoxon aufgezeigt wurde, soll nun kurz auf die experimentelle Realisierung dieses Experiments (1985, Hellmuth et al.) eingegangen werden. Als Lichtquelle diente ein 150 ps gepulster Krypton-Ionen Laser mit einer Wellenlänge von 647 nm. Bevor das Laserlicht in das Mach-Zehnder-Interferometer gelang, erfuhr es zunächst noch eine Abschwächung bis die durchschnittliche Photonenanzahl pro Puls lediglich 0.2 betrug. Das Interferometer war so aufgebaut, dass nach dem ersten Strahlteiler die beiden Arme jeweils aus einer 5 m langen optischen Faser und einem Polarisator bestanden, sodass die Laufzeit innerhalb eines Armes etwa 24 ns betrug. In den oberen Arm brachte man eine Pockels-Zelle mit einer Schaltzeit von 5 ns, mithilfe der man die Polarisationsrichtung um 90° drehen kann, und darauf folgend einen Glan-Thompson-Polarisator, mithilfe der man lediglich eine Polarisationsrichtung durchlassen kann, ein. Die Polarisatoren waren dermaßen eingestellt, dass, falls die Pockels-Zelle nicht eingeschaltet wird, das Photon, wenn es sich im oberen Arm befindet, am Glan-Thompson-Polarisator aus dem Weg entfernt wird.

Beim Versuch ging es darum, einerseits ein klassisches Experiment, d.h. die Konfiguration des Interferometers wurde noch bevor das Photon auf den ersten Strahlteiler fiel festgelegt, und andererseits ein „delayed choice“ – Experiment, d.h. die Konfiguration des Interferometers wurde noch verändert, nachdem das Photon den ersten Strahlteiler passiert hatte, durchzuführen. Es ging dabei darum, ob das Photon im oberen Interferometerarm den Glan-Thompson-Polarisator passieren kann (Nachweis des Teilchencharakters) oder nicht (Nachweis des Wellencharakters). Es zeigte sich schließlich, dass der Ausgang des Experiments unabhängig davon war, ob ein klassisches Experiment oder ein „delayed choice“ – Experiment durchgeführt wurde. Das Photon musste also nicht schon zu Beginn „wissen“, ob der obere Arm des Interferometers passierbar sein wird oder nicht.

Nach diesen experimentellen Überlegungen und Ergebnissen stellt sich zum Abschluss noch die Frage, in welcher Art und Weise man quantenmechanisch das Paradoxon auflösen kann. Wie sich zeigen wird, steht dies in engem Zusammenhang mit dem Thema, welche Fragen in der Quantenmechanik sinnvoll sind und welche man nicht stellen kann. Einen möglichen Zugang lieferte Griffith in seinen Artikeln über den sog. „consistent histories“ – Formalismus. Dabei bezeichnet man eine Abfolge von Eigenschaften eines Systems zu aufeinander folgenden Zeitpunkten als Geschichte. Da es an dieser Stelle zu weit gehen würde, auf diesen Formalismus weiter einzugehen, wird nur ein kurzer intuitiver Einblick gegeben. Innerhalb dieses Formalismus kann man die möglichen Familien von Versuch a) folgendermaßen beschreiben:

$$|a\rangle|BC\rangle \rightarrow \begin{cases} |b\rangle|BC\rangle \rightarrow |B^*C\rangle \\ |c\rangle|BC\rangle \rightarrow |BC^*\rangle \end{cases} \quad (1)$$

Das Photon trifft zunächst auf den ersten Strahlteiler. Dann befindet sich das Photon entweder im oberen Arm und löst den Detektor B aus oder das Photon befindet sich im unteren Arm und löst ein Signal am Detektor C aus. Die Familie für Versuch b) lässt sich in folgender Weise beschreiben:

$$|a\rangle|DE\rangle \rightarrow |s\rangle|DE\rangle \rightarrow \begin{cases} |d\rangle|DE\rangle \rightarrow |d\rangle|D^*E\rangle \\ |e\rangle|DE\rangle \rightarrow |e\rangle|DE^*\rangle \end{cases} \quad (2)$$

Das Photon trifft zunächst wieder auf den ersten Strahlteiler. Danach geht das Photon in den kohärenten Superpositionszustand über um am zweiten Strahlteiler entweder in jenen Arm zu gehen, an dem es später den Detektor D auslöst oder aber in jenen Arm zu gelangen, an dem es später von Detektor E nachgewiesen wird. Die Wahl der Familien ist aber nicht eindeutig, so ist auch eine Beschreibung von Versuch a) über den kohärenten Superpositionszustand möglich:

$$|a\rangle|BC\rangle \rightarrow |s\rangle|BC\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|b\rangle + |c\rangle)|BC\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|B^*C\rangle + |BC^*\rangle) \quad (3)$$

Das Photon trifft wieder auf den ersten Strahlteiler. Danach geht das Photon in den Superpositionszustand über und auch der Ausgang des Experiments lässt sich nur durch eine Superposition ausdrücken.

Man kann sich eine Vielzahl von Geschichten ausdenken, die allesamt eine mögliche Beschreibung eines Experiments liefern. Will man eine Rückfrage stellen, wo das Photon tatsächlich war (Superposition zwischen Interferometerarmen oder in einem bestimmten Arm), so erkennt man, dass dies eigentlich eine Frage ist, die man im Zuge der Quantenmechanik nicht stellen kann. Somit ist die gesamte Fragestellung des Paradoxon eigentlich sinnlos, da dies genau eine solche Frage ist. Man kann jedoch, um irgendein aufgetretenes Ergebnis zu erklären, eine bestimmte Geschichte wählen. Um beispielsweise Experiment a) im Nachhinein zu erklären, kann man auf die Familie von Geschichten unter (1) zurückgreifen, während die Geschichte (3) als Superposition nicht geeignet ist, dieses Ergebnis zu erklären.