

Aufgabe 2: Interferenzmuster am MZI - Lösungen

- 1 Experiment mit Laserlicht am MZI
 - 1.1 Es zeigt sich ein Interferenzmuster. Bei entsprechender Justierung der Spiegel und Strahlteiler entstehen konzentrische Ringe. Die entstehenden Gangunterschiede bestimmen die Interferenz.
 - 1.2 Das Wesentliche am Interferometer ist, dass das Licht in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird. Diese laufen auf verschiedenen Wegen bis sie vom zweiten Strahlteiler wieder zusammengeführt werden. Die sich dabei ergebenden Gangunterschiede führen zur Interferenz. Der Versuch demonstriert also das Wellenverhalten von Licht.
- 2 Experiment mit einzelnen Photonen am MZI
 - 2.1 Jedes nachgewiesene Photon hinterlässt einen lokalisierten „Fleck“ auf dem Schirm. Die räumliche Verteilung, die sich nach dem Nachweis von nur wenigen Photonen ergibt, weist scheinbar keinerlei Regelmäßigkeit auf. Wenn die Zahl der registrierten Photonen langsam ansteigt, sieht man, wie sich aus den „Flecken“ allmählich ein Muster herausbildet. Es handelt sich um das ringförmige Interferenzmuster, das schon im Versuch mit intensivem Laserlicht beobachtet wurde.
 - 2.2 Dieses Experiment ist ein Beispiel dafür, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchenverhalten im gleichen Experiment zeigen kann. Jedes Photon überträgt seine ganze Energie auf eine einzige Stelle auf dem Schirm. Eine derartig lokalisierte Wechselwirkung ist typisch für das klassische Teilchenmodell. Eine Welle dagegen ist über den ganzen Bereich des Schirms ausgedehnt. Sie würde ihre Energie gleichmäßig verteilen. Das Interferenzmuster wäre von Anfang an da, wenn auch in abgeschwächter Form. Aber auch das klassische Teilchenmodell reicht alleine nicht aus, um das Experiment zu erklären. Das Interferenzmuster, das sich aus den Einschlägen vieler Photonen aufbaut, ist ein charakteristisches Merkmal einer Welle. Es ist nicht klar, wie ein Teilchenmodell die Entstehung dieses Musters erklären könnte.
 - 2.3 Eine einfache Alternative zwischen Welle und Teilchen gibt es in der Quantenmechanik nicht. Ein einzelnes Modell reicht zur Beschreibung des Verhaltens von Quantenobjekten nicht aus. Die Natur ist komplexer als die Modelle, die der menschliche Geist zu konstruieren vermag. Dem Verständnis der Quantenmechanik kommt man durch eine gründliche Diskussion der Born'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation sehr viel näher. Dazu wird die Beschreibung von Quantenobjekten durch *Wellenfunktionen* $\psi(x)$ eingeführt, deren Quadrat die Wahrscheinlichkeit bestimmt, an der betreffenden Stelle ein Quantenobjekt nachzuweisen. Allerdings lassen sich nur Elektronen durch eine Wellenfunktion beschreiben.

Das **Wellenverhalten**, das sich in der Regel im Auftreten von Interferenz äußert, findet seine Erklärung darin, dass sich die Wellenfunktion räumlich und zeitlich ganz ähnlich wie eine klassische Welle (z. B. Wasserwelle) ausbreitet und dabei Phänomene wie Überlagerung und Interferenz zeigt. Beim Doppelspaltexperiment geht z. B. von jedem der Spalte eine zylindrische Welle aus. Die Interferenz zwischen diesen beiden Anteilen der Wellenfunktion erklärt das Zustandekommen des Interferenzmusters auf dem Schirm.

Andererseits wird das **Teilchenverhalten** durch die *Interpretation* der Wellenfunktion erklärt. Die Wellenfunktion ist nämlich keine direkt messbare Größe. Wie erwähnt, gibt $|\psi(x)|^2$ nur die *Wahrscheinlichkeit* an, mit der man am Ort x ein Quantenobjekt findet. Beim Nachweis verhalten sich Quantenobjekte aber teilchenhaft. Ein Photon schwärzt die Photoplatte nur an einer fest umrissenen Stelle, ein Elektron gibt seine Energie an einer einzigen Stelle auf dem Leuchtschirm ab.

Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation mit ihrer Verbindung aus wellenhafter Ausbreitung und teilchenhaftem Nachweis erklärt auf diese Weise den Hintergrund des Welle-Teilchen-Dualismus. Damit bleibt es kein Geheimnis mehr, unter welchen Umständen man Wellen- oder Teilchenverhalten erwarten kann.

2.4 Um die Erklärungskraft der Born'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation zu betonen, kann man den scheinbaren Konflikt zwischen Wellen- und Teilchenverhalten sogar noch dramatisieren.

Man stellt sich dazu eine Serie von Experiment mit einzelnen Elektronen vor. In jedem Experiment wird nur ein einzelnes Elektron nachgewiesen. Die Experimente sollen zeitlich so weit auseinanderliegen, dass ein gegenseitiger Einfluss ausgeschlossen ist. In jedem dieser Einzelexperimente findet man einen Fleck, der vom Nachweis des Elektrons herrührt. Er befindet sich an einer vermeintlich zufälligen Stelle. Notiert man bei jedem dieser Experimente die Koordinaten der Flecke und trägt sie in ein gemeinsames Diagramm ein, zeigt sich in den Eintragungen eine überraschende Struktur: das bekannte Interferenzmuster. Obwohl jedes der Experimente für sich nur einen einzelnen Fleck lieferte, der sicherlich nicht als ein Wellenphänomen oder als ein abgeschwächtes Interferenzbild aufgefasst werden kann, liefert die Gesamtheit der unabhängigen Experimente das wellentypische Beugungsmuster.