

#### Seminarausarbeitung

#### Einführung in die Quantenmechanik

Eingereicht am:

17 Mai 2017

Eingereicht von: Marc Gerhards 22559 Hamburg

E-mail: its102554 at fh-wedel.de

#### Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis		
1	Einleitung	1
2	Geschichte und Begründung der Quantenmechanik	2
3	Das Doppelspalt Experiment3.1 Versuchsaufbau und Durchführung3.2 Teilexperimente und Beobachtungen3.2.1 Interferenz am Doppelspalt3.2.2 Doppelspalt mit Messung3.2.3 Doppelspalt mit einem Photon	3 3 4 4 4 4
4	Erklärungen der Beobachtungen am Doppelspalt 4.1 Das Korpuskelmodell des Lichts	<b>7</b> 7 7 8
5	Welle-Teilchen-Dualismus 5.1 Wellenfunktion und Superposition	10 10 11
6	Verschränkung6.1Verschränkung erzeugen	13 13 14
7	Deutung der Quantenmechanik7.1 Kopenhagener Deutung	<b>15</b> 15 15
8	Zukunft der Quantenmechanik8.1 Vollständigkeit der Quantenmechanik8.2 Quantencomputer8.3 Quanten-Teleportation	17 17 17 17
9	Fazit	19
Lit	iteraturverzeichnis	20

#### Abbildungsverzeichnis

3.1	Zeigt den konzeptionellen Aufbau des beschriebenen Versuchs des Doppelspalt	
	Experiments	4
3.2	Zeigt das Interferenzmuster welches beim Beschuss eines Doppelspalts mit	
	einem Laser entsteht	5
3.3	Zeigt das Interferenzmuster welches beim Beschuss eines Doppelspalts mit einem Laser entsteht	5
3.4	Zeigt vier Momentaufnahmen mit unterschiedlich vielen abgeschossenen Pho-	
	tonen	6
4 1	Zeigt den Versuchsaufhau zum Photoelektrischen Effekt	C

#### **Vorwort**

Diese Ausarbeitung ist Teil des Seminarvortrags "Einführung in die Quantenmechanik". Welches wiederum Teil der Seminarreihe "Quantencomputer und Quantenkryptographie" des IT-Security Studiengangs der FH-Wedel im Sommersemester 2017 ist. Dieses Seminarthema teilt sich auf in zwei Vorträge von Tom Engel und Marc Gerhards. Ziel dieser Ausarbeitung ist die Einführung in die Quantenmechanik. Es soll ein grundlegendes Verständnis über den Umfang, die Funktionsweise und die Bedeutung der Quantenmechanik vermittelt und die Grundlagen für die weiteren Vorträge gelegt werden.

# 1

#### **Einleitung**

Vor den Entdeckungen von Max Planck im Jahre 1900 nahm man an, dass man die Physik quasi an ihre Grenzen gebracht hat und in den folgenden Jahren nur noch einzelne Nachkommastellen der einzelnen Naturkonstanten verfeinern würde. Doch gab es einige Versuche in der klassischen Physik die sich mit den bisherigen Theorien nicht erklären ließen. Zum Beispiel die Ultraviolett-Katastrophe (Rayleigh-Jeans-Gesetz), wonach die Strahlungsenergie erhitzter Körper mit kurzer Wellenlänge ins unendliche ansteigt. Hier setzt die 1900 entdeckte Quantenmechanik ein, die eine der allgemeinsten Theorien zur Erklärung unserer Welt liefert und bis dahin als grundlegend angenommene Ansichten der Welt neu definiert. So hilft uns die Quantenmechanik die Welt im kleinsten und unsere Umwelt besser zu verstehen. Zudem basieren fast alle technischen Erfindungen der jüngeren Vergangenheit auf quantenmechanischen Effekten. Und auch wenn man heute die quantenmechanischen Effekte nachweisen, bestimmen und in Teilen berechnen und damit arbeiten kann, so gilt auch heute noch der Satz von Richard Feynmann: "Wer behauptet, die Quantenphysik zu verstehen, hat sie nicht verstanden". In den folgenden Kapiteln sollen die Grundlagen der Quantenmechanik vermittelt werden. Dazu wird anfangs der historische Hintergrund der Entdeckung der Quantenmechanik thematisiert. Anschließend sollen anhand zweier Experimente am Doppelspalt die Auswirkungen der Quantenmechanischen Effekte gezeigt und anschließend erklärt werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. "100 Jahre Quantentheorie" S.25 [4]

## Geschichte und Begründung der Quantenmechanik

Das Jahr der Entdeckung der Quantenphysik und damit der Quantenmechanik datiert man auf 1900. In diesem Jahr entdeckte Max Planck bei der Untersuchung von schwarzen Körpern das nach ihm benannte Plancksche Strahlungsgesetz.<sup>1</sup> Planck stellte fest, dass sich das Strahlungsverhalten eines solchen schwarzen Körpers nur mittels der Annahme erklären ließ, dass die Strahlung in kleinen Paketen abgegeben wird.<sup>2</sup> Bis dahin berechnete man das Strahlungsverhalten mittels des Rayleigh-Jeans-Gesetzes, welches zwar für das sichtbare Licht korrekte Werte, jedoch bei der Berechnung für kurze Wellenlängen eine rasch ins unendliche ansteigende Energie ergab. Dieser Umstand ist als Ultraviolett-Katastrophe bekannt.

Plancksches Strahlungsgesetz:  $\Delta E = hf$ 

Planck entdeckte also, dass strahlende Körper Energie immer nur in einem diskreten Vielfachen des Energiequantums, dem Planckschen Wirkungsquantum, abgeben oder aufnehmen. Warum diese Entdeckung zu seiner Zeit unvorstellbar war, was selbst Planck dazu brachte sich vorerst von seinen Ergebnissen zu distanzieren, war die Frage ob Licht aus Teilchen oder Wellen besteht. Nachdem man lange zeit annahm, dass das Korpuskelmodell von Isaac Newton, welches Licht als Teilchen beschreibt, korrekt sei, kam um 1800 jedoch mit den Experimenten zum Doppelspalt die Annahme auf, dass Licht eine Welle sei. Als Planck also seine Entdeckung machte, galt seit fast hundert Jahren die Annahme, dass Licht Welleneigenschaften hat. Albert Einstein nahm sich den Forschungsergebnissen von Planck an und erklärte 1905 seine Entdeckungen mit dem Photoelektrischen Effekt.

In den kommenden Jahren festigten verschiedene Wissenschaftler wie Werner Heisenberg, Niels Bohr oder Erwin Schrödinger die Quantenmechanik als eine Grundlegende Wissenschaft. Heute ist die Quantenphysik eine der am meist untersuchten und nachgewiesenen Theorien überhaupt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. S.V [3]

 $<sup>^{2}</sup>$ Vgl. S.20 [3]

 $<sup>^{3}</sup>$ Formel 3/3 S.19 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Vgl. S.7 [3]

#### Das Doppelspalt Experiment

Zum Beginn des 19. Jahrhundert führten Thomas Young (1773–1829) und Augustin Fresnel (1788–1827) erstmals Beugungsversuche mit Licht und unter anderem am Doppelspalt durch. Die dabei entdeckten Erkenntnisse sorgten bis zu den Entdeckungen von Max Planck dafür, dass die Diskussion darüber ob Licht Welle oder Teilchen ist in die Richtung der Wellentheorie kippte und damit 100 Jahre als führende Theorie angenommen wurde. Damit eignet sich das Doppelspalt Experiment hervorragend für einen Einstieg in die Effekte der Quantenmechanik anhand der geschichtlichen Entwicklung der Erkenntnisse mit diesem Experiment. Im folgenden Kapitel soll der Versuchsaufbau des Doppelspalts und die Beobachtungen an selbigen bei Versuchsdurchführung dargestellt werden.

#### 3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Für den Versuchsaufbau wird ein Laser, ein Doppelspalt und eine Sensorwand benötigt. In seiner ursprünglichen Form würde man das Experiment mit dem Licht der Sonne vorführen, aber um es zur Vorführung handlicher zu gestalten bedienen wir uns des Lasers. Bemerkenswerterweise ist der Laser ein Resultat der Entdeckungen zur Quantenmechanik. Die Funktionsweise des Lasers soll hier jedoch nicht weiter thematisiert werden. Relevant für das Vorhaben ist die kontrollierte Abgabe von Photonen unter konstanten Bedingungen, wie Intensität und Frequenz. Und einer Wellenlänge im sichtbarem Spektrum des Lichts. Häufig kommen hier rote Laser zum Einsatz deren Wellenlänge zwischen 600nm und 650nm liegt.

Dazu kommt ein maschinell gefertigter Doppelspalt. Um klare Ergebnisse bei dem Experiment zu bekommen benötigen wir scharfe Kanten an den beiden Spalten und die Spalte müssen eine Breite kleiner der Wellenlänge des Lasers haben. Als Sensorwand kann man jede beliebige Wand oder ein Stück Papier nehmen, da wir direkt die visuellen Effekte betrachten und keine Verteilungsmessung oder ähnliches vornehmen werden. Nun wird der Doppelspalt in angemessenem Abstand zur Wand aufgestellt und anschließen der Laser auf den Doppelspalt ausgerichtet. Verdeutlicht wird dieser Aufbau durch Abbildung 3.1.<sup>2</sup> Nun schalten wir den Laser ein und befeuern den Doppelspalt mit einem Strahl aus Photonen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. S.7 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Häufig wird zwischen Doppelspalt und Wand noch eine Sammellinse aufgestellt, um die zu beobachtenden Effekte größer darstellen zu können.

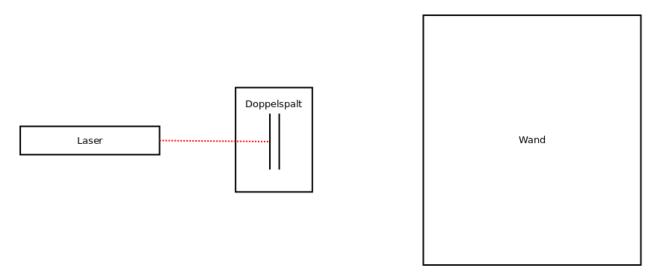


Abbildung 3.1: Zeigt den konzeptionellen Aufbau des beschriebenen Versuchs des Doppelspalt Experiments.

#### 3.2 Teilexperimente und Beobachtungen

Nachdem der Versuchsaufbau erklärt wurde, sollen ein paar mögliche Teilexperimente dargestellt werden, die beim Verständnis der Quantenmechanik und zur geschichtlichen Entwicklung hilfreich und anschaulich sind. Die Erklärung der Ergebnisse wird in den folgenden Kapiteln behandelt.

#### 3.2.1 Interferenz am Doppelspalt

Wird der Doppelspalt mit dem Laser befeuert, entsteht an der Wand ein Interferenzmuster. Also mehrere unterschiedlich stark ausgeprägte Striche. Zu sehen in Abbildung 3.2.<sup>3</sup>

#### 3.2.2 Doppelspalt mit Messung

Nun soll gemessen werden durch welchen Spalt des Doppelspalts das jeweilige Photon durchgeht. Führt man hierzu ein Messinstrument ein, welches die Photonen direkt am Spalt misst, erhält man jedoch ein andere Ergebnis. Anstelle des Interferenzmusters an der Wand, sehen wir nun zwei klare Striche an der Wand. Zusehen in Abbildung 3.3.

#### 3.2.3 Doppelspalt mit einem Photon

In diesem Versuch soll das Doppelspalt Experiment mit einem einzigen Photon durchgeführt werden. Das Ergebnis dieses Experimentes ist ein einziges gemessenes Teilchen auf der Sensorwand. Und auch dieses Teilchen befindet sich nicht in direkter Linie mit dem Laser und dem Doppelspalt. Wiederholt man dieses Experiment mit weiteren einzelnen Photonen, so stellt man fest dass nie ein Photon an der selben Stelle gemessen wird. Mit zunehmender

 $<sup>^{3}</sup>$ Abb. 5/3 S.42 [3]



Abbildung 3.2: Zeigt das Interferenzmuster welches beim Beschuss eines Doppelspalts mit einem Laser entsteht.



Abbildung 3.3: Zeigt das Interferenzmuster welches beim Beschuss eines Doppelspalts mit einem Laser entsteht.

#### 3 Das Doppelspalt Experiment

Menge an abgeschossenen Photonen kann man zudem das bereits bekannte Interferenzmuster erkennen. Zu sehen in Abbildung 3.2 in Grafik d. Ein Bild mit der Verteilung über die Zeit zeigt Abbildung  $3.4.^4$ 

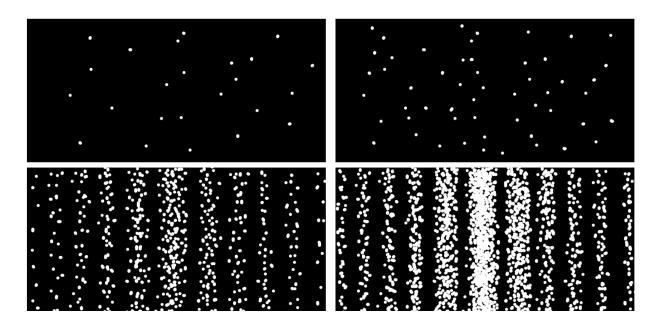


Abbildung 3.4: Zeigt vier Momentaufnahmen mit unterschiedlich vielen abgeschossenen Photonen.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Abb.39.1 S.39 [2]

## Erklärungen der Beobachtungen am Doppelspalt

Nun sollen die Beobachtungen die in dem Experiment zum Doppelspalt festgestellt werden konnten genauer erklärt werden. Dazu soll die geschichtliche Entwicklung der Erklärung, ob Licht nun eine Welle oder ein Teilchen ist, genauer betrachtet werden.

#### 4.1 Das Korpuskelmodell des Lichts

Das Korpuskelmodell wird hauptsächlich Isaac Newton zugeschrieben. Dabei besteht die Annahme, dass das Licht aus Strahlen kleiner Teilchen besteht (Korpuskeln). Dies war lange die vorherrschende Theorie zum Licht. Nehmen wir also an, dass die Photonen, welche wir auf den Doppelspalt schießen, kleine Teilchen sind. Dann müssten einige Photonen am Rahmen abgefangen und einige durch einen der Spalte gehen und in gerader Linie auf die Wand treffen. Folglich würden wir zwei senkrechte Striche an der Wand erwarten. Der Versuch in Kapitel 3.2.1 zeigt jedoch, dass wir an der Wand ein Interferenzmuster erkennen können.

#### 4.2 Das Wellenmodell des Lichts

Das zu beobachtende Interferenzmuster beim Doppelspalt Experiment und weitere Brechungsversuche mit Licht waren Anfang des 19. Jahrhunderts dann auch der Grund für die Annahme, dass Licht eine Welle ist.<sup>1</sup> Teilchen können kein Interferenzmuster bilden. Dies ist eine Eigenschaft von Wellen. Wellen können sich gegenseitig durch konstruktive und destruktive Interferenz verstärken oder abschwächen.<sup>2</sup> Die wesentliche Eigenschaft der Teilchen ist ihre stets positive Anzahl und Masse, für die ein Erhaltungssatz gilt.<sup>3</sup> Verständlich wird dies anhand folgender Formel:

Welle + Welle = verschwindende Welle ist möglich Teilchen + Teilchen = keine Teilchen ist unmöglich<sup>4</sup>

Nehmen wir also an, dass das Licht eine Welle ist und diese auf den Doppelspalt trifft. Die beiden Spalte im Doppelspalt haben eine Breite kleiner der Wellenlänge des Lichts. Dadurch

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. S.39 [3]

 $<sup>^{2}</sup>$ Vgl. S.5 [3]

 $<sup>^{3}</sup>$ Vgl. S.4 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Vgl. S.4 Kasten [3]

entsteht hinter jedem der Doppelspalte eine eigene Elementarwelle.<sup>5</sup> Das Bild lässt es bereits erahnen. Tatsächlich könnte man das Doppelspalt-Experiment in angepasster Form auch mit Wasserwellen nachbauen.

Diese beiden Wellen interferieren nun miteinander und durch gegenseitige Verstärkung und Auslöschung erhalten wir das beobachtbare Interferenzmuster. Doch haben wir immer noch die Beobachtungen aus dem zweiten Teilexperiment in Kapitel 3.2.2, bei dem wir durch eine Messung nachweisen können, dass ein Photon durch nur einen der Spalte gegangen ist. Zudem verschwindet das Interferenzmuster an der Wand und die Photonen verhalten sich wieder wie Teilchen.

#### 4.3 Der Photoelektrische Effekt

Nachdem wir nun gesehen haben, dass weder das reine Korpuskelmodell noch das Wellenmodell alle Aspekte unseres Experiments beschreiben können, wollen wir uns den Entdeckungen zur Begründung der Quantenmechanik von Max Planck, welche kurz in Kapitel 2 angeschnitten wurden, widmen.

Planck erklärte die Strahlungseigenschaften von schwarzen Körpern mit dem Planckschem Strahlungsgesetz<sup>6</sup>  $\Delta E = hf$ . Was in Folge bedeutet, dass ein strahlender Körper Licht immer nur in diskreten Portionen abgibt, nämlich gequantelt und immer in einem Vielfachen des Planckschem Wirkungsquantums h.<sup>7</sup> 1905 erklärte Einstein dies mit dem Photoelektrischem Effekt.<sup>8</sup>

Für die Erklärung ziehen wir wieder ein Experiment heran, skizziert in Abbildung 4.1<sup>9</sup>.

In dem Versuch strahlt eine Quecksilberdampflampe auf eine blank geschmirgelte Zinkplatte. An der Zinkplatte ist ein Elektroskop angeschlossen, welches die Ladung misst. Dieses schlägt auf Grund der negativ geladenen Zinkplatte dem entsprechend aus. Nun bringt man das Glas zwischen Lampe und Platte an und schaltet die Quecksilberdampflampe ein. Es findet keine Veränderung statt. Zieht man nun die Glasscheibe zur Seite, reduziert sich der Ausschlag des Elektroskops schnell auf null.<sup>10</sup>

Folglich ist die Zinkplatte anfangs negativ geladen, hat also einen Elektronenüberschuss. Das Licht, welches durch die Glasscheibe auf die Platte fällt, verändert nichts. Erst das Entfernen der Glasplatte führt dazu, dass sich anscheinend Elektronen aus der Zinkplatte lösen und sich die Ladung des Elektroskops reduziert. Dabei liefert das Licht die Energie nötige Energie für die Austrittsarbeit. Bemerkenswerte Beobachtungen hierbei sind, dass die Intensität des anstrahlenden Lichts keine Rolle spielt, ob das Licht fähig ist Elektronen auszulösen, da mit der Glasscheibe keine ausgelöst wurden. Diese lässt zwar sichtbares Licht durch, aber ultraviolettes wird abgefangen. Ohne Glasscheibe konnte dann das Ultraviolette Licht mit

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Vgl. S.8 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Für konkretere Ausführungen dieses Zusammenhangs konsultieren Sie bitte die Ausarbeitung von Herrn Engel.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Vgl. S.19 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Vgl. S.26 Satz 5f und S.27 [2]

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>S. 15 Abb. 3/1 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Vgl. S.15 [3]

 $<sup>^{11}\</sup>mathrm{Dies}$  hängt mit der sehr kurzen Wellenlänge von ultraviolettem Licht zusammen.

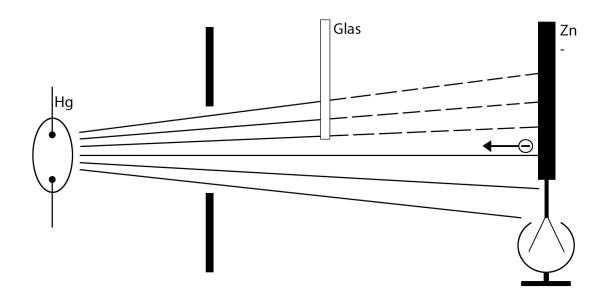


Abbildung 4.1: Zeigt den Versuchsaufbau zum Photoelektrischen Effekt.

seiner hohen Frequenz die Elektronen auslösen. Dies ist auch bei sehr geringer Intensität möglich.  $^{12}$ 

Versucht man dies nun mit dem Wellenmodell zu erklären, stößt man auf ein Problem, welches unseren Beobachtungen widerspricht, veranschaulicht durch die Formel:  $W = DA_e t_A$ . <sup>13</sup> Durch unsere Lampe nehmen wir eine konstante Bestrahlung und Leistungsdichte für  $D(Watt/m^2)$  an und eine sehr geringe Fläche  $A_e$  für die Energieaufnahme des Elektrons an. Dies bedeutet aber, dass das Elektron die nötige Energie für die Austrittsarbeit über den Zeitraum  $t_A$  ansammeln könnte. Dies würde bedeuten Licht jeder Frequenz und Intensität wäre in der Lage Elektronen auszulösen. Je nach Intensität der Bestrahlung in kürzerer oder längerer Zeit. Unser Experiment zeigt jedoch, dass dies nicht der Fall ist. Licht mit zu geringer Frequenz kann keine Elektronen lösen. Unabhängig von der Intensität. Es entscheidet nur die Frequenz ob das Licht diese Fähigkeit aufweist oder nicht. <sup>14</sup> Als Beispiel könnte man sich hier einen Regenschirm vorstellen. Bei Regen, auch wenn die Intensität des Regens zunimmt, wird der Schirm nicht reißen und den Träger vor dem Regen schützen. Wenn jedoch Objekte mit mehr Energie auf den Schirm treffen, wie zum Beispiel große Hagelkörner, dann kann der Schirm reißen. Damit können wir den Photoelektrischen Effekt nicht mit dem Wellenmodell des Lichts verstehen. <sup>15</sup>

Abschließend kann man zusammenfassen, die Beobachtungen am Doppelspalt lassen sich nur mit einer gemeinsamen Betrachtung von Licht als Welle und als Teilchen verstehen.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Vgl. S.15f [3]

 $<sup>^{13}</sup>$ Vgl. Formel 3/1 [3]

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Anzumerken ist hier, dass für andere Materialien, die eine geringere Austrittsarbeit benötigen um Elektronen zu lösen, der Photoelektrische Effekt auch bei geringeren Frequenzen auftreten kann.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Vgl. S.16 [3]

#### Welle-Teilchen-Dualismus

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass weder das Korpuskelmodell noch das Wellenmodell des Lichts alle Beobachtungen am Doppelspalt erklären können. Aber wir können das Verhalten von Licht direkt am Doppelspalt und dem resultierendem Interferenzmuster mit dem Wellenmodell erklären. Und den Photoelektrischen Effekt sowie die Beobachtungen aus Kapitel 3.2.3 kann man mit einem Teilchenmodell erklären. Dies ist der Welle-Teilchen-Dualismus. Objekte der Quantenmechanik haben Wellen- und Teilcheneigenschaften und müssen dementsprechend durch eine Theorie beschrieben werden, die beide Aspekte abdeckt.

#### 5.1 Wellenfunktion und Superposition

Doch wie erklärt man nun die Verbindung zwischen den beobachteten Wellen- und Teilcheneigenschaften? Denn das Teilchenmodell erklärt nicht alle beobachtbaren Eigenschaften aus 3.2.3. Der Versuch mit einzelnen Photonen zeigt, dass das Interferenzmuster erst durch eine große Menge an abgeschossenen Photonen zustande kommt.<sup>1</sup> Feuert man nur ein Photon ab, so kann man zwar grob vorhersagen in welchem Bereichen es auftreffen wird, aber nie die genaue Position. Zudem landet jedes abgeschossene Photon an einem anderen Ort auf dem Sensorschirm.

Wie lässt sich also nun das Verhalten der Photonen erklären. Wenn sich das Photon als Welle ausbreitet, dann dürfte man mehrere Positionen auf der Sensorwand als Ergebnis erwarten und vor dem Auftreffen bestimmbare Positionen vorhersagen können. Doch wie in Kapitel 3.2.2 gezeigt, befindet sich das Photon nach der Messung nur an exakt einem Ort und dieser ist zudem nicht vorhersagbar.

Das Auftreffen des Photons auf der Sensorwand kann man als Messprozess betrachten, bei dem die exakte Position des Photons festgestellt wird. Solange das Photon jedoch nicht gemessen wird, verhält es sich wie eine Welle. Und zwar eine Welle der möglichen Auftrittswahrscheinlichkeit des Teilchens. Deswegen kann man auch nicht vorhersagen an welchem Ort das Photon am Ende gemessen wird. Die absolute Position ist bis zum Messprozess lediglich eine Wahrscheinlichkeit.<sup>2</sup> An der Position A ist die Wahrscheinlichkeit, dass hier das Teilchen am Ende gemessen wird am höchsten.

Denn das Teilchen befindet sich in Superposition. Diese Vorstellung ist unvereinbar mit der klassischen Physik bei der man exakt vorhersagen könnte, wo das Teilchen landet. Ähnlich einem Ball den man wirft. Die Superposition beschreibt nun eine Überlagerung mehrerer

 $<sup>^{1}</sup>$ Vgl. S.42 Abb.5/3a-d [3]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Abbildung 1.2 S.24 [1]

Zustände, von denen alle mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten können.<sup>3</sup> Solange die Superposition erhalten bleibt, solange hat das Teilchen keine exakte Position.

Dieses Verhalten beschreibt die Wellenfunktion bzw. die Auftrittswahrscheinlichkeit wird durch das Quadrat der Wellenfunktion beschrieben.<sup>4</sup>

In dem Moment in dem jedoch ein Messprozess stattfindet, dass heißt eine Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen, in dem Moment muss die Position des Teilchens bekannt sein und damit wird die Superposition zerstört. Das Teilchen tritt an einer Position auf und die Wellenfunktion zeigt nur noch einen starken Ausschlag an der aktuellen Position des Teilchens an. Man spricht hierbei von dem Kollapse der Wellenfunktion.<sup>5</sup>

Und auf diese Weise lässt sich die Position des Photons an der Sensorwand erklären. Die Wellenfunktion des Photons, welches sich in dem Raum bewegt, trifft auf die Sensorwand und in diesem Moment tritt ein Messprozess auf und das Photon nimmt eine Position ein. Dabei könnte das Photon, mit entsprechender Wahrscheinlichkeit, überall dort auftreten, wo die Wellenfunktion nicht null ist.

Und diese Wahrscheinlichkeit wird durch das Interferenzmuster wiedergegeben. Diese Annahme wird durch den Beschuss mit mehreren Teilchen belegt, da diese, obwohl ihre Position nur eine Wahrscheinlichkeit ist, mit immer mehr Teilchen immer exakter das Interferenzmuster nachzeichnen.

Doch was sagt dies über die Bestimmtheit der Welt und unsere wahrgenommene Realität aus. Hier kommt auf einmal der Zufall ins Spiel, wo Wissenschaft ansonsten exakte Vorhersagen ermöglicht, muss man nun bei gleicher Ausgangslage unterschiedliche Ergebnisse erwarten. Einstein war großer Skeptiker der Quantenmechanik und beschrieb seine Skepsis mit dem Satz "Gott würfelt nicht".

#### 5.2 Superposition an großen Dingen

Nun kann man die Superposition häufig nur an kleinen Teilchen durch Experimente untersuchen. Allerdings gibt es keine prinzipielle Limitierung der Superposition auf kleinste Teilchen. Einstein war, obwohl er selber den Photoelektrischen Effekt erklärt hat, ein großer Skeptiker der Quantenmechanik. So konnte er sich nicht mit dem Gedanken anfreunden, dass ein Teilchen quasi nicht da ist, wenn es sich in Superposition befindet und stellte einen Vergleich zur Welt im Großen an. Die Frage die er stellte war "Existiert der Mond, auch wenn keiner hinsieht?". Bei dieser Frage ist der Betrachter die Messstation und der Mond das Objekt. Und die Annahme wäre, dass der Mond nur zu einer konkreten Position gezwungen wird, wenn jemand ihn ansieht.

Allerdings ist das Problem bei allen größeren Dingen als kleinste Teilchen jenes, dass ständig Wechselwirkungen mit der Umwelt stattfinden. Niemand muss den Mond beobachten, damit er in Wechselwirkung mit seiner Umwelt tritt. Der Mond wird z.B. in jedem Moment von unzähligen Photonen der Sonne getroffen.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Vgl. S.23 [1]

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Für tiefere Ausführung dieses Bereichs konsultieren sie bitte die Ausarbeitung von Tom Engel.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Abbildung 1.3 S.25 [1]

#### 5 Welle-Teilchen-Dualismus

Tatsächlich sind quantenmechanische Effekte nicht auf kleinste Teilchen limitiert. Man konnte sogar bereits ein Doppelspalt Experiment mit Buckminster-Fulleren  $C_{60}$ , einem Molekül aus 60 Kohlenstoffatomen, durchführen.<sup>6</sup> Allerdings gelingt dies auch nur in einer Vakuumröhre, da das Molekül sonst mit anderen Teilchen kollidieren und seine Superposition verlieren würde.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Vgl. "Interferenz einzelner massiver Teilchen" S.37 [4]

# 6

#### Verschränkung

Eine weitere quantenmechanische Eigenschaft ist die Verschränkung. Bei der Verschränkung werden zwei Teilchen miteinander verschränkt. Dies bedeutet, dass die beiden Teilchen miteinander verbunden sind, ohne eine direkte erkennbare Verbindung zu haben. Konkret bezieht sich dies auf die Eigenschaft eines Teilchens, wie zum Beispiel den Spin. Der Spin ist eine Rotation des Teilchens um die eigene Achse. Angenommen man hat zwei verschränkte Photonen und beide haben den gleichen Spin. Dreht man nun den Spin eines Teilchens um, so gleicht das andere entfernte und verschränkte Teilchen seinen Spin an. Und diese Anpassungen finden zeitgleich statt. Es vergeht keine Zeit zwischen der Veränderung an dem einen und der Anpassung an dem anderen Teilchen.

Albert Einstein bezeichnete die Verschränkung als "spukhafte Fernwirkung", denn es kann keine direkte Verbindung zwischen den Teilchen nachgewiesen werden. Sie verhalten sich dennoch voneinander abhängig. Dies erzeugt jedoch Probleme im Bezug auf das Prinzip der Lokalität, wonach Ereignisse nur Auswirkung auf ihre direkte Umgebung haben.<sup>1</sup> Es spielt aber keine Rolle wie weit die beiden verschränkten Teilchen auseinander liegen, sie bilden immer noch ein Gesamtsystem. Dies konnte zuletzt von der Arbeitsgruppe um Anton Zeilinger auf unserem Planeten nachgewiesen werden. Man schaffte es zwei verschränkte Teilchen zu erzeugen und eines von La Palma nach Teneriffa zu schicken. Die Verschränkung bleibt bestehen, auch bei einer Entfernung von 144 Kilometern.<sup>2</sup> Lange Zeit suchte man nach einer Erklärung für diese Eigenschaft. Man nahm an, dass die Teilchen vielleicht versteckte, noch nicht bekannte, Variablen aufweisen, die bei dem Akt des Verschränkens gesetzt werden.

Allerdings konnte man in mehreren ausführlichen Experimenten nachweisen, dass es sich bei den verschränkten Teilchen um ganz normale Teilchen handelt und dass es keine versteckten Variablen gibt.

#### 6.1 Verschränkung erzeugen

Um Verschränkung zwischen zwei Teilchen zu erzeugen wird ein ultravioletter Laserstrahl auf einen nicht linearen Kristall ausgerichtet. Der Laserstrahl wird hier als Pumpstrahl bezeichnet. Der Kristall kann aus einem Photon zwei Photonen machen. Dabei wird das System nicht aufgeteilt auf die beiden Photonen sondern die beiden Photonen sind zusammen das Gesamtsystem.<sup>3</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. "Die Wirklichkeit der Quanten" S.41 [4]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Vgl. S.41 [4]

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>S.40 "Wie erzeugt man verschränkte Photonen" [4]

#### 6.2 Überlichtgeschwindigkeit Informationsteleportation

Wenn also die verschränkten Quanten ohne dass Zeit vergeht sich einander anpassen. Bedeutet das nun, dass diese Information mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen wird? Denn nach der speziellen Relativitätstheorie kann nichts schneller als das Licht sein und damit auch keine Information zwischen den verschränkten Quanten. Tatsächlich wird die Anpassung des verschränkten Teilchens sofort vorgenommen, aber um mit diesem Umstand etwas anfangen zu können, müsste man eine separate Nachricht vom Anpassenden des ersten Teilchens erhalten und diese könnte klassisch nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit sein.<sup>4</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Vgl. S.20 "Quanten-Teleportation" von Anton Zeilinger [4]

#### Deutung der Quantenmechanik

Da sich die Quantenmechanik so stark von der klassischen Physik unterscheidet und in vielen Bereichen einer Deutung der Erkenntnisse bedarf, entstanden über die Zeit verschiedene Deutungen der Quantenmechanik. In diesem Kapitel sollen zwei Deutungen exemplarisch vorgestellt werden. Zum einen die Deutung auf der diese Ausarbeitung beruht, der Kopenhagener Deutung. Und zum anderen die Interpretation die vermutlich unsere Welt am grundlegendsten verändern würde und die lange Zeit völlig unterschätzt wurde, die Viele-Welten-Theorie.

#### 7.1 Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung ist die am breitesten akzeptierte Deutung der Quantenmechanik und wurde 1927 von Niels Bohr und Werner Heisenberg während ihrer Arbeit in Kopenhagen entwickelt und diese Ausarbeitung basiert auf den Annahmen dieser Deutung.

Im Kern interpretiert die Kopenhagener Deutung den Übergang von quantenmechanischer zu klassischer Welt als Zufallsergebnis. Ein Teilchen befindet sich in Superposition an keiner exakten Position und bei einer Wechselwirkung (Messprozess) wird die Position nach dem Zufall bestimmt, dessen Wahrscheinlichkeiten die Wellenfunktion angibt.

Der Vorteil dieser Deutung ist, dass ein Objekt in Superposition am Ende doch in die reale Welt übergeht und damit ein Ergebnis eintritt, nämlich jenes, dass der Beobachter misst. Das Problem bei der Kopenhagener Deutung ist der Kollapse der Wellenfunktion. Der Kollapse ist zwar das beobachtbare Ergebnis, jedoch gibt es keine Gleichung die diesen erklärt.

Zu den Kopenhager Deutung muss man erwähnen, dass es nicht die eine Version dieser Interpretation gibt. Es gibt mehrere Ausprägungen unter anderen von Niels Bohr und Werner Heisenberg, die zwar zusammen die Deutung entwickelt haben, aber auch nicht in allen Aspekten übereinstimmten.

#### 7.2 Viele-Welten-Theorie

Die Viele-Welten-Theorie wurde von Hugh Everett in den 1950er Jahren als Teil seiner Dissertation entwickelt und lange Zeit ignoriert.<sup>1</sup> Tatsächlich nahm man seine Dissertation erst nach einer Kürzung an. Vermutlich wegen dem, was diese Deutung für unsere Realität bedeuten würde.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>[5, Vgl. "Der Werdegang seiner Theorie" S.71 Satz 1]

#### 7 Deutung der Quantenmechanik

Die Kopenhagener Deutung geht davon aus, dass es eine Realität gibt und dass ein Quantenteilchen zwar in Superposition sein kann, aber bei einer Messung die Superposition zerstört (Kollapse der Wellenfunktion) und das Quantenteilchen eine Position in der realen Welt einnehmen muss.

An sich ist dies allerdings ein Bruch mit der Wellenfunktion. Der Kollapse wird in der Kopenhagener Deutung als Resultat des Messprozesses angenommen. Dies ist der Übergang von Quantenwelt zu unserer klassischen Welt. Nach der Viele-Welten-Theorie muss man jedoch auch das Messgerät als Quantenmechanisches Objekt betrachten.

Hierzu ein vereinfachtes Beispiel. Die Position eines Teilchens ist noch nicht bestimmt und es kann sich zu 40 Prozent an Ort A und zu 60 Prozent an Ort B auftreten. Findet nun ein Messprozess statt, so würde laut Kopenhagener Deutung die Superposition des Teilchens zerstört werden und das Teilchen müsste eine Position in unserer einen Realität einnehmen. Also vermutlich Position B. Laut der Viele-Welten-Theorie wird aber nicht die Superposition des Teilchens zerstört, sondern das Messgerät selber gerät in Superposition. Die Realität würde sich aufspalten und von da an gibt es eine Realität in dem das Teilchen an Position A und eine in dem es an Position B is. Jeder Messprozess, jede Wechselwirkung würde neue parallele Realitäten erzeugen.<sup>2</sup>

So unglaublich die Viele-Welten-Theorie klingen mag, sie beruht auf grundlegenden Quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten. Zudem gilt die Schrödinger Gleichung uneingeschränkt und die Wellenfunktion kollabiert nie.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Angelehnt an das Beispiel aus "Der Mathematische Weg zu den Vielen Welten" S. 71 [5]

#### Zukunft der Quantenmechanik

In diesem Kapitel sollen aktuelle Entwicklungen in der Quantenmechanik thematisiert werden, die neue Einsatzmöglichkeiten und Effekte der Quantenmechanik beschreiben. Aber es soll im ersten Unterpunkt auch einmal ein Blick auf die Vollständigkeit der Quantenmechanik geworfen werden.

#### 8.1 Vollständigkeit der Quantenmechanik

Keine der Deutungen der Quantenmechanik aus Kapitel 7 konnte bisher alle Aspekte der Quantenmechanik erklären. Deshalb nimmt man an, dass entweder die Quantenmechanik noch nicht abgeschlossen ist und wichtige Teile der Theorie fehlen oder es eine noch allgemeiner Theorie gibt, die alle Aspekte unserer Welt erklärt und zu der die Quantenmechanik eine untergeordnete Theorie darstellt.<sup>1</sup>

#### 8.2 Quantencomputer

Mit Hilfe der Superposition und Verschränkung von Teilchen kann man sogenannte Qubits erzeugen. Diese können durch die Superposition nicht nur 1 oder 0 als Zustand haben sondern vier parallele Zustände. Dies würde die Rechenleistung der bisherigen Computer auf ein völlig neues Level heben.<sup>2</sup>

#### 8.3 Quanten-Teleportation

In Kapitel 6 haben wir die theoretischen Grundlagen hierzu gesehen. Mit Hilfe der Verschränkung von zwei entfernten Teilchenmengen soll ein Körper teleportiert werden. An sich ist dieses Experiment auch bereits an einzelnen Teilchen gelungen, aber das Teleportieren von Menschen oder überhaupt größeren Gegenständen ist noch weit entfernt. Allerdings wirft auch die Quantenteleportation mehrere philosophische Fragen auf, nämlich über das Selbstverständnis einer Person. Bei der Quantenteleportation wird nämlich nicht das Objekt als Masse teleportiert, sondern lediglich die Information, wie das Objekt aufgebaut ist.<sup>3</sup> Und

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Vgl. "100 Jahre Quantentheorie" S.33 [4]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Dieses Thema wird in dem Seminarvortrag von Lars Reimers behandelt.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Vgl. "Vorbereitung einer Quanten-Teleportation" S.16 [4]

#### 8 Zukunft der Quantenmechanik

in der Natur der Quantenverschränkung wird das ursprüngliche Objekt zerstört. Folglich hat man keinen direkten Klonprozess, aber auch keine Bewegung des original Objektes. Allerdings wird das Objekt bei der Zielstation aus Einheitsteilchen zusammen gesetzt. Auf ebene der Atome, Elektronen und Photonen gibt es keine unterschiedlichen Eigenschaften mehr, es sind identische Teilchen.

# 9 Fazit

Es wurde gezeigt, wie man selbst an einfachen Experimenten die quantenmechanischen Auswirkungen auf unsere Welt nachweisen kann. Und wie das Doppelspalt Experiment 100 Jahre die Ansicht zum Licht als Welle geprägt hat. Erst durch Max Plancks Forschungen und die Arbeit von Werner Heisenberg, Albert Einstein, Niels Bohr und Erwin Schrödinger wurde die Quantenmechanik zu einer eigenständigen Wissenschaft und heute beruhen viele moderne Geräte und Effekte auf den Grundlagen der Quantenmechanik. Dabei konnte mit dem Welle-Teilchen-Dualismus und durch die verschiedenen Deutungen gezeigt werden, dass die Quantenmechanik bis heute nicht komplett erklärt ist und viele Aspekte weiterer Forschung bedürfen. Zudem haben nicht nur die Anfänge der Quantenmechanik neue philosophische Fragen aufgeworfen. Auch jüngere Erkenntnisse wie die Wechselwirkungsfreie Messung und vor allem die Quanten-Teleportation werfen neue Fragen über unser Realitätsund Persönlichkeitsverständnis auf.

Und da bis heute grundlegende Aspekte der Quantenmechanik unbeantwortet sind, hat der Satz von Richard Feynman bis heute bestand "Wer behauptet die Quantenmechanik verstanden zu haben, der hat sie nicht verstanden".

#### Literaturverzeichnis

- [1] David J. Griffiths. Quantenmechanik Lehr- und Uebungsbuch. Lilienthalstrasse 2, D-85399 Hallbergmoos: Pearson Deutschland GmbH, 2012. ISBN: 978-3-86894-114-2.
- [2] Alto Brachner und Richard Fichtner. *Quantenmechanik*. Hannover: Hermann Schroedel Verlag KG, 1980. ISBN: 3-507-10573-X.
- [3] Dr. Josef Schreiner. Anschauliche Quantenmechanik. Diesterweg, 5140, Salle: Verlag Moritz Diesterweg, 1978. ISBN: 3-425-05140-7.
- [5] Spektrum der Wissenschaft Highlights. *Parallelwelten*. Slevogstrasse 3-5, 69126, Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, 2012.
- [4] Spektrum der Wissenschaft Highlights. *Quanteninformation*. Slevogstrasse 3-5, 69126, Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, 2012. ISBN: 978-3-941205-96-3.