



Universität Hamburg

Department
Physik



Aufbau und Erprobung eines Experiments zur Quantenphysik für Schulen

Hausarbeit zur Ersten Staatsprüfung für das Lehramt Oberstufe
Allgemeinbildende Schulen im Fach Physik

verfasst von

Uwe Leib

Erstgutachter: Prof. Dr. Klaus Sengstock

Zweitgutachter: Prof. Dr. Wilfried Wurth

vorgelegt am: 20.7.2010

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Aufbau und Erprobung eines Doppelspaltexperiments mit einzelnen Photonen. Das Experiment wird im Rahmen des Kooperationsprogramms-”Light and Schools“ am Institut für Laserphysik der Universität Hamburg aufgebaut, welches in Zusammenarbeit mit Schulen moderne Laborexperimente mit Laserlicht ermöglicht. Hierdurch soll die Ausbildung in den Schulen verbessert und Interesse für Themen aus dem Bereich Laser-Physik geweckt werden.

Die bereits bestehenden drei Experimente beschäftigen sich mit der Untersuchung der Interferenzeigenschaften von Laserlicht, der Streuung von Lichtstrahlen an Schallwellen sowie mit Aufbau und Justage eines Festkörperlasers. Nun soll das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen hinzukommen. Hierzu wurde von TEACHSPIN/USA ein fertiger Experimentieraufbau bezogen.

Diese Arbeit ergründet Funktion und technische Möglichkeiten der Apparatur. Die Apparatur erlaubt es, die Streuung am Doppelspalt und seinen beiden Einzelspalten für zwei verschiedene Lichtquellen (Laser oder Glühlampe) aufzunehmen. Als Detektor dient im Fall des Lasers eine Photodiode, die einzelnen Photonen der Glühlampe werden mit einem Photomultiplier nachgewiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Schülerskript erstellt, das die physikalischen Grundlagen und die Anleitung zur Durchführung des Doppelspaltexperiments enthält. Im Skript wird das Entstehen des Interferenzbilds am Doppelspalt mit dem Wellenmodell rekapituliert und bei Durchführung des Experiments mit Teilchen der statistische Charakter der Messungen und die Wahrscheinlichkeitsaussagen erarbeitet. Aufbau und Funktion der einzelnen Komponenten der Apparatur werden im Schülerskript erläutert.

Zur Erstellung des Skripts werden die mit dem Doppelspaltexperiment zu vermittelnden Inhalte und Kompetenzen analysiert. Durch Untersuchung eines aktuellen Unterrichtskonzepts sowie von Untersuchungen zu Lernschwierigkeiten beim Lernen von Quantenphysik wurde herausgefunden, dass das Doppelspaltexperiment mit Laser bzw. einzelnen Photonen sehr gut geeignet ist, Interferenz im Wellen- und Teilchenmodell zu demonstrieren und auf diese Weise eine gute Einführung in die Quantenphysik und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation geben kann.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
0 Einleitung.....	5
1 Historie zur Quantenphysik.....	7
2 Grundlagen zum Doppelspaltexperiment.....	9
2.1 Doppelspaltexperiment mit Kugeln.....	9
2.2 Doppelspaltexperiment mit Wellen.....	11
2.3 Doppelspaltexperiment mit Elektronen.....	13
3 Quantenphysik in der Schule.....	17
3.1 Traditioneller Quantenphysikunterricht und Lernschwierigkeiten.....	17
3.2 Abwandlungen des traditionellen Konzepts zur Quantenphysik.....	20
3.3 Experimente im naturwissenschaftlichen Unterricht.....	22
4 Das Doppelspaltexperiment.....	26
4.1 Apparative Grundlagen des Doppelspaltexperiments.....	26
4.2 Didaktische Überlegungen zum Doppelspaltexperiment.....	30
4.3 Konzept des Schülerskripts und der Experimentieranleitung.....	33
5 Fazit und Ausblick.....	36
Literaturverzeichnis.....	38
Anhang.....	40
A1 Schülerskript zum Doppelspaltexperiment.....	40
A2 Nachbereitung zum Doppelspaltexperiment.....	40
A3 Probemessungen.....	40
A4 Dokumentation zum LabView-Messprogramm.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Doppelspaltexperiment mit Kugeln.....	10
Abbildung 2.2: Doppelspaltexperiment mit Wasserwellen.....	11
Abbildung 2.3: Doppelspaltexperiment mit Elektronen.....	13
Abbildung 2.4: Doppelspaltexperiment mit beobachteten Elektronen.....	15
Abbildung 4.1: TeachSpin Two-Slit Interference, One Photon at a time.....	26
Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau der TeachSpin-Apparatur.....	27
Abbildung 4.3: Linkes Bedienfeld.....	27
Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau des Doppelspaltexperiments.....	28
Abbildung 4.5: Shutter/Detektor.....	29
Abbildung 4.6: Rechtes Bedienfeld.....	30

0 Einleitung

Jeder kann sich sicher noch an das Experimentieren in der Schule erinnern. Teilweise konnten besonders wichtige oder spannende Experimente im Rahmen des Schulunterrichts nicht real durchgeführt werden, sondern wurden nur theoretisch im Physikbuch oder als Film vorgeführt.

Um die Ausbildung in den Schulen in einer Weise zu verbessern, die Schülerinnen und Schülern Einblick in die Welt der Forschung ermöglicht, haben sich in den letzten Jahren mehrere Initiativen gegründet. Eines dieser Programme ist das Kooperationsprogramm-”Light and Schools“¹ am Institut für Laserphysik der Universität Hamburg, welches in Zusammenarbeit mit denjenigen Schulen, die sich in der Oberstufe auf Physik als profilgebendes Fach festgelegt haben, moderne Laborexperimente mit Laserlicht ermöglicht. Hierdurch soll Interesse für Themen aus dem Bereich Laserphysik geweckt und den Schülerinnen und Schülern ein Einblick in wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen ermöglicht werden.

Ziel von ”Light and Schools“ ist, die gesellschaftliche Relevanz der Forschung mit Licht in das Bewusstsein von Schülerinnen und Schülern zu rufen und das Interesse für das Schulfach Physik und naturwissenschaftliche Studienfächer zu wecken. Die aktuell bestehende Kooperation mit der Sophie-Barat-Schule soll in den kommenden Jahren auf weitere Schulen ausgedehnt werden. Beim Pilotprojekt hatten erstmals Ende 2009 Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie die Forschungslabore des Instituts für Laserphysik kennen zu lernen und sich mit drei Schülerexperimenten im Bereich Optik und Laserphysik zu beschäftigen. Das Pilotprojekt wurde mit großem Erfolg durchgeführt und fand bei den beteiligten Schülerinnen und Schülern besonderen Anklang. Nun soll als viertes Schülerexperiment das Doppelspaltexperiment hinzukommen.

Thema dieser Arbeit ist der Aufbau und die Erprobung des Doppelspaltexperiments für Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Kooperationsprogramms-“Light and Schools“.

¹ Das Programm ”Light and Schools“ wurde vom Direktor des Instituts für Laserphysik an der Universität Hamburg, Prof. Dr. Klaus Sengstock ins Leben gerufen und ist in den Landesexzellenzcluster ”Frontiers in Quantum Photon Science“ eingebunden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist einerseits zu analysieren, welche Stärken das Doppelspaltexperiment beim Verständnis der Quantenphysik hat und andererseits welche technischen Möglichkeiten die Doppelspalt-Apparatur bietet. Danach ist zu diskutieren, welche Inhalte und Kompetenzen mit der Durchführung des Doppelspaltexperiments als Schülerexperiment am Institut für Laserphysik schließlich vermittelt werden können und wie diese Ziele zu erreichen sind.

Dazu wird, zur Einordnung des Doppelspaltexperiments, im ersten Kapitel kurz die Vorgeschichte der heutigen Quantenphysik vorgestellt, um im folgenden Kapitel die physikalische Bedeutung des Doppelspaltexperiments und die Entwicklung der Quantenphysik ausgehend vom Wellen- und Teilchen-Konzept hin zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation zu analysieren. Im dritten Kapitel wird untersucht, worauf bei der Konzeption des Doppelspaltexperiments als Schülerexperiment zu achten ist. Hierbei wird, sowohl anhand des Lehrplans, als auch exemplarisch an einem aktuellen Konzept für Quantenphysik im Unterricht sowie an einem Schulbuch analysiert, welche Inhalte und Kompetenzen mit dem Doppelspaltexperiment vermittelt werden können und welche Funktion das Doppelspaltexperiment im Unterrichtsverlauf haben kann. Außerdem wird untersucht welche Lernschwierigkeiten bei Schülerinnen und Schülern beim Lernen von Quantenphysik häufig auftreten. Abschließend analysiere ich Möglichkeiten und Anforderungen für einen effektiven Einsatz von Schülerexperimenten im Unterricht. Im letzten Kapitel werden zunächst der genaue experimentelle Aufbau und die technischen Möglichkeiten der neu beschafften Doppelspalt-Apparatur untersucht. Danach werden unter Abwägung der didaktischen und technischen Möglichkeiten die Zielvorstellungen und das Konzept für die Durchführung des Schülerexperiments erarbeitet, nach denen einerseits das Skript und die Experimentieranleitung sowie andererseits die Ergebnisdiskussion mit dem Betreuer und die Nachbereitung konzipiert werden.

Alle für die Schülerinnen und Schüler erstellten Texte sind im Anhang dieser Arbeit angefügt. Alle Bilder und Abbildungen in dieser Arbeit und den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Texten sind vom Autor selbst erstellt worden.

1 Historie zur Quantenphysik

Über Jahrhunderte haben sich Naturwissenschaftler um die mathematische Beschreibung optischer Phänomene bemüht und durch Experimente und Gedankenexperimente zu ergründen versucht, ob die "Natur des Lichts" eine Welle oder ein Teilchenstrom ist. Zum Ende des 19. Jahrhunderts unterschied man in den Naturwissenschaften grundsätzlich zwischen Materie und Strahlung und beschrieb beides durch verschiedenartige Gesetze.

Die klassische Mechanik beschreibt die Bewegung materieller Körper durch die Gesetze der Newtonschen Mechanik, wobei der Zustand eines Teilchens durch Angabe von Ort $x(t)$ und Impuls $p(t)$ charakterisiert wird (vgl. Newton 1687).

Bei Strahlungsvorgängen gelang es 1861-1864 durch Aufstellung der Maxwell'schen Gleichungen, eine elektromagnetische Theorie zu schaffen, mit der die bisher als unabhängig angesehenen Bereiche Elektrizität, Magnetismus und Optik einheitlich beschrieben werden konnten. Maxwell betrachtet Licht als elektromagnetische Welle, die elektrische und magnetische Feldenergie transportiert. Diese Theorie der elektromagnetischen Strahlung wurde durch Entdeckung der Hertz'schen Wellen experimentell bestätigt. Heinrich Hertz leitete 1886-1888 alle damals bekannten elektrischen und magnetischen Erscheinungen aus den Maxwellgleichungen ab und wies die optischen Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen, wie Geradlinigkeit, Beugung, Polarisation, Reflexion und Brechung, nach (vgl. Hertz 1888, S.609f).

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts ergaben sich jedoch grundlegende Veränderungen für die Vorstellungen von Licht und der Wechselwirkung mit Materie, weil die Resultate des photoelektrischen Effekts, die Hohlraumstrahlung und der Compton-Effekt nur zu erklären waren, wenn man Licht einen Korpuskelcharakter zuschreibt. Mit der Annahme, dass sich Licht in festen Energieportionen, sogenannte Quanten, ausbreitet gelang es Max Planck 1900 den idealen Wärmestrahler durch das Plancksche Strahlungsgesetz zu beschreiben (vgl. Planck 1901, S. 553f). Ausgehend von Plancks Überlegungen, lieferte Albert Einstein 1905 mit seiner Lichtquantenhypothese eine Erklärung für den Photoeffekt (vgl. Einstein 1905, S.145f).

Da sich nach den Vorstellungen der klassischen Physik die Konzepte "Welle" und "Teilchen" gegenseitig ausschließen und die Wechselwirkungen von Licht mit Mate-

rie sowie die Struktur der Materie wie zum Beispiel Elektronenbeugung oder Atom-spektren nicht konsistent beschrieben werden können, war ein neues Konzept notwendig. Bohr, Heisenberg und Born erreichten schließlich 1927 eine konsequente mathematische Beschreibung von Licht und Materie im mikroskopischen Bereich durch Einführung einer Wahrscheinlichkeitsamplitude, die eine Welle ist, welche die die Wahrscheinlichkeit bestimmt, Teilchen an einer bestimmten Stelle nachzuweisen. Diese Kopenhagener Interpretation beschreibt die Effekte im mikroskopischen Bereich sehr genau und ist bis heute die von den meisten Physikern vertretene Interpretation der Quantenmechanik.

2 Grundlagen zum Doppelspaltexperiment

Die Einführung des Quantenverhaltens ist in der theoretischen Physik über viele Wege möglich. Viele Bücher zum Thema Quantenphysik verweisen jedoch immer wieder auf die Einführung der Quantenphysik in den *Lectures on Physics* von Richard P. Feynman. Sie entstanden 1961/62 aus einem Projekt zur Reform der Physik-Einführungsvorlesungen am *California Institute of Technology* gemeinsam mit Matthew Sands und Robert B. Leighton. Für Feynman war es immer wichtig, die interessanten aber unanschaulichen Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik Laien und Studenten nahezubringen und verständlich zu machen. 1972 erhielt Feynman für seine Leistungen in der Vermittlung der Physik die *Oersted Medal* der *American Association of Physics Teachers*. Wegen ihrer Anschaulichkeit werden die Gedanken und Gedankenexperimente von Feynman auch in vielen Schulbüchern aufgegriffen. Ich verwende sie auch im Schülerskript und stelle Feynmans Konzept hier kurz vor. Feynman betrachtet, bevor er auf das Quantenverhalten von Elektronen eingeht, vorab einerseits Überlegungen zum Doppelspaltexperiment mit Kugeln und andererseits zum Doppelspaltexperiment mit Wellen (vgl. Feynman 1992, S.17-57). Durch das Experiment mit Kugeln arbeitet Feynman den statistischen Charakter der Messungen mit Teilchen heraus und erarbeitet beim Experiment mit Wellen das Zustandekommen der auftretenden Interferenzphänomene. Beim Experiment mit Elektronen wird die Wahrscheinlichkeitsinterpretation über die Wellenfunktion dann phänomenologisch durch Analogie zum klassischen Wellenphänomen hergeleitet.

2.1 Doppelspaltexperiment mit Kugeln

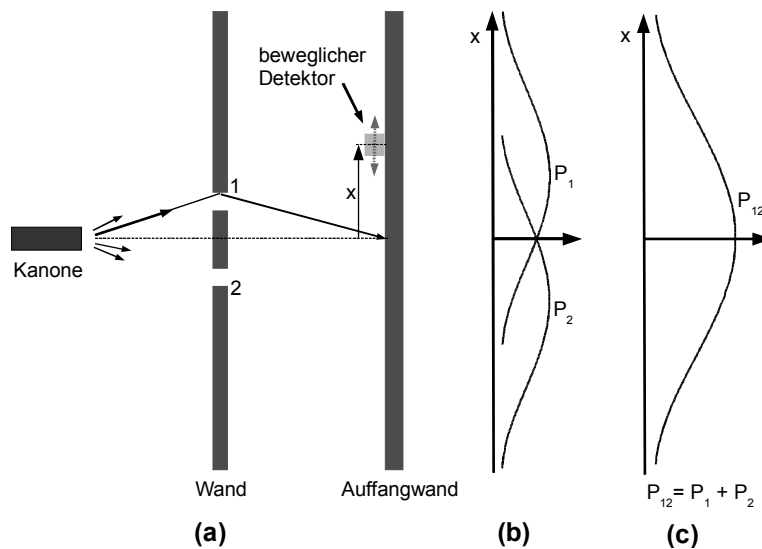


Abbildung 2.1: Doppelspaltexperiment mit Kugeln

Abbildung 2.1(a) zeigt den theoretischen Aufbau zum Gedankenexperiment eines Doppelspaltexperiments mit massiven Kugeln, die links von einer Kanone abgeschossen werden. Hinter der Kanone befindet sich eine Wand aus Stahlplatten mit zwei Löchern. Jedes Loch ist gerade groß genug, um eine Kugel durchzulassen. Hinter einer Wand aus Stahlplatten befindet sich in einigem Abstand eine Auffangwand aus einem weichen Material, die alle Kugeln absorbiert. Vor der Auffangwand ist ein in x -Richtung verschiebbarer Detektor angebracht, mit dem sich für ein Zeitintervall die Zahl der Kugeln, die im Abstand x vom Mittelpunkt auftreffen, bestimmen lassen. Mit einer solchen Apparatur könnte man nun experimentell die Antwort auf die Frage finden: *Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kugel, die durch die Wand geht, im Abstand x vom Mittelpunkt an der Auffangwand auftrifft?* (vgl. Feynman 1992, S. 18). Hierzu kann man nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen, denn man kann nicht mit Bestimmtheit sagen, welchen Weg die einzelne Kugel nehmen wird. Mit Wahrscheinlichkeit ist hier die Chance gemeint, dass eine Kugel im Detektor landet. Diese Chance kann man messen, wenn man die Kugeln zählt, die in einer bestimmten Zeiteinheit am Detektor ankommen, und dann das Verhältnis zur Gesamtzahl der in dieser Zeit an der Auffangwand ankommenden Kugeln bildet. Betrachtet man in einem Gedankenexperiment die Kugeln idealisiert als unzerstörbar, so kommen die Kugeln an der Auffangwand immer als ganze zusammenhängende

Objekte an. In Abbildung 2.1(c) ist das erwartete Ergebnis P_{12} dargestellt, dass die Kugel durch eines der beiden Löcher gegangen ist und am Ende an Position x an der Auffangwand auftrifft. Wenn man eines der Löcher verschließt, können die Kugeln nur noch durch das andere Loch in der Platte gehen, daher ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 gemäß Abbildung 2.1(b). Wenn man die Ergebnisse in Abbildung 2.1(b) der Messungen mit jeweils einem verschlossenen Spalt, mit dem Ergebnis "beide Spalte offen" in Abbildung 2.1(c) vergleicht, stellt man fest, dass sich beide Wahrscheinlichkeiten einfach addieren: $P_{12} = P_1 + P_2$.

2.2 Doppelspaltexperiment mit Wellen

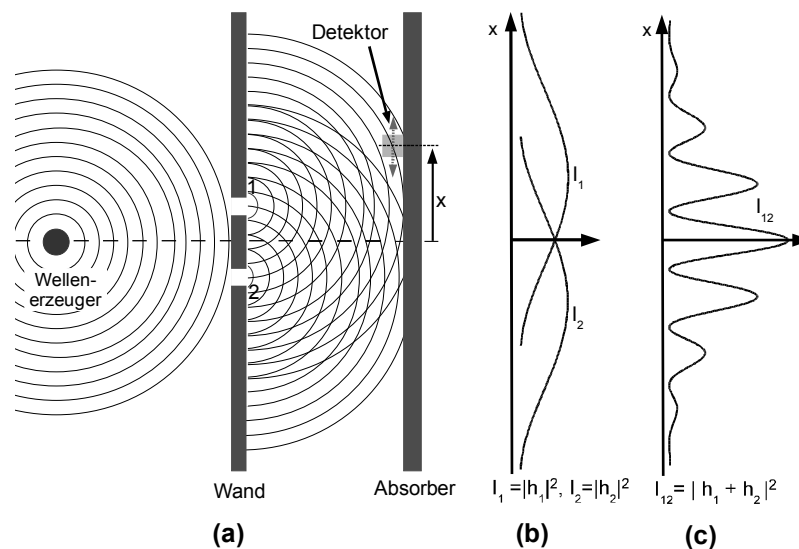


Abbildung 2.2: Doppelspaltexperiment mit Wasserwellen

Im Folgenden wird das Verhalten von Wasserwellen untersucht. In einer flachen Wanne mit Wasser wird ein kleiner Stempel auf- und abwärts bewegt, wodurch im Wasser kreisförmige Wellen erzeugt werden. Rechts von der Quelle befindet sich wieder eine Wand mit zwei Löchern und dahinter eine zweite Wand die die ankommenden Wellen absorbiert. Die Amplitude einer Welle (Wasserhöhe) wird im folgenden mit h bezeichnet. Der in x -Richtung verschiebbare Detektor misst nun die Intensität der Wellenbewegung.

Zuerst stellt man bei diesem Experiment fest, dass die Intensität jeden beliebigen Wert annehmen kann. Hier kommt also kein ganzes zusammenhängendes Objekt mit

einem festen Wert an wie bei dem im Abschnitt 2.1 behandelten Experiment mit massiven Kugeln.

Nach Messung der Wellenintensität für verschiedene x -Werte bei gleichmäßig arbeitendem Wellenerzeuger und jeweils einem verdeckten Spalt, erhält man für die Intensitätsverteilung am Absorber die in Abbildung 2.2(b) dargestellten Kurven I_1 und I_2 .

Mit beiden geöffneten Spalten misst man die in Abbildung 2.2(c) dargestellte Intensitätsverteilung I_{12} , die offensichtlich nicht mit der Summe von I_1 und I_2 übereinstimmt. Die Entstehung dieses Interferenzmusters kann durch Beugung der ursprünglichen Welle an den Spalten, die dann wieder Ausgangspunkt neuer kreisförmiger Wellen sind, erklärt werden. Das beobachtete Muster entsteht durch Interferenz zwischen beiden Wellen.

An den Stellen, an denen die Kurve I_{12} ein Maximum hat, sind die Wellen "in Phase" und es tritt sogenannte konstruktive Interferenz auf. Konstruktive Interferenz gibt es immer dort, wo der Abstand vom Detektor zu einem Loch um ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge größer oder kleiner ist, als der Abstand vom Detektor zum anderen Loch. An den Stellen, wo die beiden Wellen mit einer Phasendifferenz von π ankommen, tritt destruktive Interferenz auf, weil hier Wellental auf Wellenberg trifft. Solche niedrigen Werte erwartet man immer dann, wenn der Abstand zwischen Loch 1 und Detektor sich um ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge vom Abstand zwischen Loch 2 und dem Detektor unterscheidet. Das Zustandekommen von Interferenz im Wellenmodell wird im Schülerskript (Anhang A1, S. 39) graphisch verdeutlicht.

Quantitativ lässt sich der Zusammenhang zwischen I_1 , I_2 und I_{12} wie folgt beschreiben: Die aktuelle Wasserhöhe für die Welle am Detektor aus Loch 1 kann als Realteil von $h_1 e^{i\omega t}$ geschrieben werden, wobei die Amplitude h_1 im allgemeinen eine komplexe Zahl ist. Die Intensität ist proportional zum mittleren Quadrat der Höhe oder mit komplexen Zahlen zum Quadrat des absoluten Betrages $I_1 = |h_1|^2$. Entsprechend ergibt sich für die Welle aus Loch 2 die Höhe $h_2 e^{i\omega t}$ und die Intensität $I_2 = |h_2|^2$.

Wenn beide Löcher geöffnet sind, addieren sich die Wellenhöhen zur Höhe $(h_1 + h_2)e^{i\omega t}$ und zur Intensität $I_{12} = |h_1 + h_2|^2$.

Mit dem Kosinussatz und der Phasendifferenz δ zwischen h_1 und h_2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} I_{12} &= |h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2h_1h_2 \cos \delta \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \end{aligned}$$

Das Vorzeichen des Kosinus bestimmt eine Verstärkung oder Abschwächung der Intensität. Das Interferenzmuster wird in großem Maße bestimmt durch das Verhältnis von Wellenlänge zum Abstand der Streuzentren. Zur Entstehung deutlich erkennbarer Interferenzerscheinungen müssen beide vergleichbare Größenordnung haben.

2.3 Doppelspaltexperiment mit Elektronen

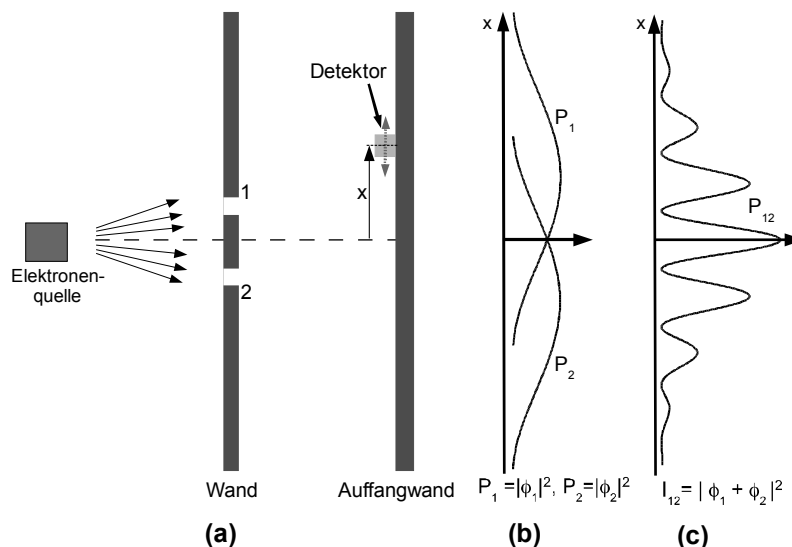


Abbildung 2.3: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Ein ähnliches Experiment kann man auch mit Elektronen durchführen (siehe Abbildung 2.3). Um die hier im Fokus stehenden Effekte beobachten zu können, müssen alle Teile der Apparatur sehr klein sein. Um das Prinzip des Experiments zu verstehen, werden Apparatur und Ablauf ohne Rücksicht auf den Maßstab und die Größenverhältnisse als Gedankenexperiment besprochen. Auf der linken Seite befindet sich eine Elektronenkanone. Rechts von der Quelle befindet eine Wand mit zwei Löchern, etwas weiter rechts die Auffangwand und vor der Auffangwand der in x -Richtung

verschiebbare Detektor. Als Detektor eignen sich ein Geigerzähler oder Photomultiplier, der mit einem Lautsprecher verbunden ist, um die gemessenen Signale hörbar zu machen.

Bei der Durchführung des Experiments wird man feststellen, dass die Knackgeräusche im Lautsprecher sehr unregelmäßig zu hören sind, aber bei Messungen über einen ausreichend langen Zeitraum die durchschnittliche Rate immer gleich ist. Wenn man den Detektor in x -Richtung verschiebt, erhöht bzw. reduziert sich die Rate mit der die Knackgeräusche zu hören sind. Setzt man den Elektronenausstoß der Quelle herab, so reduziert dies die Rate der Knackgeräusche und wenn man zwei Detektoren vor der Auffangwand platziert, spricht immer nur einer der beiden an. Daraus schließt man, dass alle Elektronen, die an der Auffangwand ankommen, dort immer als ganze zusammenhängende Objekte eintreffen. Analog zum Gedankenexperiment mit massiven Kugeln ergibt sich die relative Wahrscheinlichkeit, dass die Elektronen an der Auffangwand im Abstand x von der Mitte ankommen, durch Registrierung der "Knack"-Rate an Position x bei konstantem Elektronenfluss der Quelle.

Um die Kurve P_{12} und das Verhalten von Elektronen zu verstehen, führt Feynman einen Widerspruchsbeweis an, in dem er zuerst annimmt, dass die Elektronen entweder durch Loch 1 oder durch Loch 2 gehen (vgl. Feynman 1992, S. 23). Wenn diese Behauptung zutrifft, kann man alle an der Auffangwand eintreffenden Elektronen in zwei Gruppen einteilen: "die durch Loch 1 gehen" und "die durch Loch 2 gehen". Daher muss die Kurve, die wir registrieren, die Summe der Effekte der Elektronen durch Loch 1 und Loch 2 sein. Messungen mit jeweils einem geschlossenen Loch ergeben die Kurven P_1 und P_2 in Abbildung 2.3(b). Die Kurve P_{12} in Abbildung 2.3(c), die man erhält, wenn beide Löcher offen sind, ist jedoch offensichtlich nicht die Summe der Wahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 für jedes Loch allein. Analog zum Experiment mit Wasserwellen stellen wir fest, dass Interferenz auftritt und $P_{12} \neq P_1 + P_2$ gilt.

Es stellt sich nun die Frage, wie eine solche Interferenz entstehen kann. Vielleicht ist die Aussage, dass Elektronen entweder durch Loch 1 oder durch Loch 2 gehen, in Frage zu stellen. In Abbildung 2.3(c) sieht man, dass es an der Auffangwand einige Stellen gibt, an denen sehr wenige Elektronen ankommen, wenn beide Löcher geöffnet sind; die aber, wie in Abbildung 2.3(b) ersichtlich, viele Elektronen empfangen,

wenn eines der beiden Löcher geschlossen wird. Außerdem ist der zentrale Wert von P_{12} signifikant mehr als doppelt so groß, als die Einzelwahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 .

Analog zu den Wasserwellen erhält man eine einfache Beschreibung der Effekte, indem man die Ankunfts wahrscheinlichkeiten an der Auffangwand durch zwei komplexe Zahlen $\phi_1(x)$ und $\phi_2(x)$ angibt. Das Absolutquadrat von ϕ_1 ergibt die Effekte, wenn nur Loch 1 offen ist ($|\phi_1|^2 = P_1$), analog ergibt sich $P_2 = |\phi_2|^2$, wenn nur Loch 2 geöffnet ist. Im Fall "beide Löcher offen" ergibt sich ebenfalls analog zu den Wasserwellen die Ankunfts wahrscheinlichkeit $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$.

Dies bedeutet, dass die Elektronen wie Teilchen immer als ganze zusammenhängende Objekte mit einem festen Wert an der Auffangwand ankommen und die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dieser Objekte ist verteilt wie die Intensität einer Welle. So lässt sich folgern, wieso sich ein Elektron manchmal wie ein Teilchen und manchmal wie eine Welle verhält.

Die Situation ändert sich jedoch schlagartig, wenn man beobachtet, durch welches Loch die Elektronen hindurch treten.

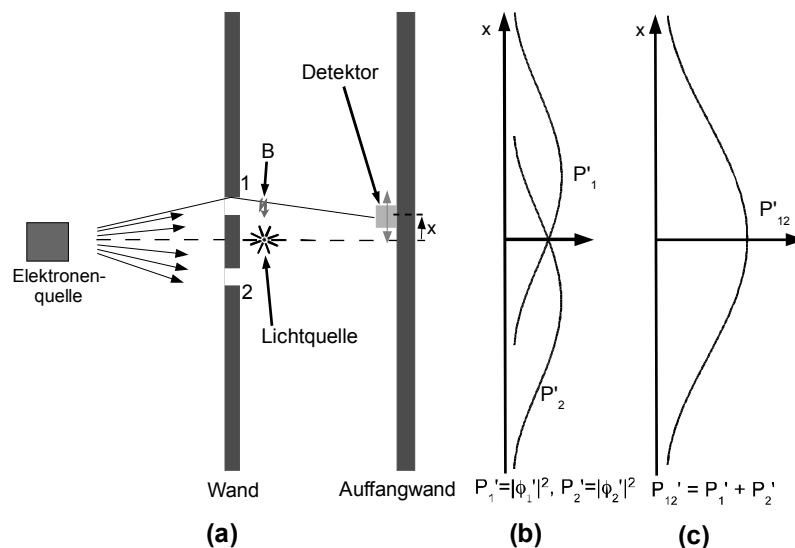


Abbildung 2.4: Doppelspaltexperiment mit beobachteten Elektronen

Platziert man, wie in Abbildung 2.4(a) gezeigt, hinter der Wand eine starke Lichtquelle, sieht man (wegen der Streuung von Licht an Ladungen) beim Durchtritt durch

die Wand an der Position (B) einen kurzen Lichtblitz und kann so zuordnen, durch welches der beiden Löcher das Elektron hindurch getreten ist.

Mit dieser experimentellen Anordnung registriert man, durch welches Loch die Elektronen jeweils hindurch getreten sind, und erhält, ganz ähnlich zu den Messwerten P_1 und P_2 mit unbeobachteten Elektronen, die in Abbildung 2.4(b) dargestellten Kurven für die Ankunfts-wahrscheinlichkeiten P_1' und P_2' . Das Ergebnis für die Gesamtwahrscheinlichkeit P'_{12} könnte man nun einfach dadurch erhalten, dass man annimmt, man habe die Lichtblitze nie gesehen und die Zahlen für Loch 1 und Loch 2 einfach addiert. Hierbei ergibt sich jedoch nicht die schon bekannte Interferenzkurve P_{12} für unbeobachtete Elektronen aus Abbildung 2.3(c), sondern eine neue in Abbildung 2.4(c) dargestellte Kurve P'_{12} , die offensichtlich keine Interferenz zeigt.

Aus der Tatsache, dass die Verteilung der Elektronen an der Auffangwand für "beobachtete" Elektronen anders ist, als für "unbeobachtete" Elektronen schließt man, dass der Messprozess des Beobachtens das Zustandekommen von Interferenzerscheinungen verhindert. Erst wenn man die Wellenlänge der Lichtquelle des Beobachters soweit erhöht, dass sie größer als der Abstand der beiden Löcher ist, ist wieder Interferenz zu beobachten. Dabei kann jedoch nicht mehr auf den genauen Wegverlauf des Elektrons geschlossen werden, da der beobachtete Lichtblitz keine Ortsauflösung zwischen Loch 1 oder Loch 2 mehr erlaubt. Dieses Prinzip hat Heisenberg als Unbestimmtheitsprinzip in die Quantenphysik eingeführt und für das hier dargestellte Experiment würde es folgendermaßen lauten: *Es ist unmöglich einen Apparat zu entwickeln, der feststellt, durch welches Loch das Elektron hindurch tritt, ohne dass der Apparat gleichzeitig die Elektronen soweit stört, dass das Interferenzbild zerstört wird.* Bisher hat niemand einen Weg gefunden, der um das Unbestimmtheitsprinzip herumführt. Daher muss davon ausgegangen werden, dass das Unbestimmtheitsprinzip eine grundsätzliche Eigenschaft der Natur beschreibt (vgl. Feynman 1992, S. 28).

Im Experiment mit Kugeln in Abschnitt 2.1 sind die Wellenlängen für massive Kugeln so klein, dass die Interferenzlinien sehr fein werden. Ein physikalischer Detektor überdeckt die Schwankungen der Wahrscheinlichkeitskurve, so dass eine mit der klassischen Kurve übereinstimmende quasi gemittelte, glatte Kurve gemessen wird.

3 Quantenphysik in der Schule

Vorgänge im atomaren und subatomaren Bereich werden durch die Quantenmechanik beschrieben. Sie ist damit wichtige Grundlage für viele Teilgebiete der modernen Physik, Chemie, Biologie, Medizin und hat nicht zuletzt unser Weltbild in den letzten 90 Jahren wesentlich verändert. Aus diesem Grund ist es wichtig, bereits Schüler mit einigen ausgewählten Aspekten der Quantenphysik vertraut zu machen. Die mathematische Beschreibung der Quantenphysik ist wegen ihrer Komplexität kaum in der Schule zu vermitteln, aber das Erfassen der grundlegenden Ideen und Konzepte auf qualitativer Ebene ist möglich und gewinnbringend und daher im Lehrplan auch vorgesehen.

Im folgenden Kapitel wird erörtert, welche Inhalte und Kompetenzen mit dem Doppelspaltexperiment als Schülerexperiment vermittelt werden können. Neben der Analyse der gemäß Lehrplan zu vermittelnden Inhalte der Quantenphysik, wird der Einsatz des Doppelspaltexperiments exemplarisch in einem aktuellen Unterrichtskonzept zur Quantenphysik sowie in einem Schulbuch für die Oberstufe untersucht. Mit Blick auf das Schülerskript wird weiterhin untersucht, welche Lernschwierigkeiten häufig beim Lernen von Quantenphysik auftreten und wie diese abzuschwächen sind. Abschließend werden die Rolle von Schülerexperimenten, ihre Möglichkeiten sowie die Anforderungen für ihren effektiven Einsatz im Unterricht diskutiert.

3.1 Traditioneller Quantenphysikunterricht und Lernschwierigkeiten

Die gymnasiale Oberstufe gliedert sich in Hamburg an Gesamtschulen in eine einjährige *Vorstufe* (Klasse 11) gefolgt von einer zweijährigen *Studienstufe* (Klasse 12/13) sowie an Gymnasien in eine *Einführung in die Oberstufe* (Klasse 10) gefolgt von der zweijährigen *Studienstufe* (Klasse 11/12).

Im Kerncurriculum zum Physikunterricht in der Studienstufe sind die verbindlichen Inhalte sehr kurz in einer Tabelle zusammengefasst (Freie und Hansestadt Hamburg 2009, S. 14):

Feldkonzept	Wellenkonzept	Teilchenkonzept	Quantenkonzept
Gravitation	Harmonische Schwingungen	Atommodelle	Quantelung
Elektrische Felder	Mechanische Wellen	Struktur der Materie	Stochastisches Verhalten
Magnetische Felder	Elektromagnetische Wellen		Unbestimmtheit Komplementarität

Die Einführung des Quantenkonzepts soll durch Aufzeigen der Tatsache erfolgen, dass die bisher behandelten Theorien der klassischen Physik bei der Behandlung von Quantenobjekten ihre Grenzen finden und Licht und Materie weder allein Wellen- noch allein Teilchencharakter haben.

Im Rahmenplan Physik werden die Kompetenzen, die eine Grundbildung ausmachen, vier Kompetenzbereichen zugeordnet (Freie und Hansestadt Hamburg 2009, S. 10):

Fachkenntnisse	Die Schülerinnen und Schüler verfügen über ein gefestigtes Fachwissen zu physikalischen Phänomenen und Gesetzmäßigkeiten sowie zu physikalischen Begriffen, Prinzipien und Fakten.
Fachmethoden	Die Schülerinnen und Schüler verfügen über naturwissenschaftliche Methoden, sie wenden Modelle und Arbeitstechniken an.
Kommunikation	Die Schülerinnen und Schüler erschließen Informationen sach- und fachbezogen und tauschen diese aus.
Bewertung	Die Schülerinnen und Schüler erkennen und bewerten physikalisch-technische Sachverhalte in verschiedenen Kontexten.

Zu den neuen kompetenzorientierten Bildungsplänen sind wegen der Hamburger Schulreform keine aktuellen Erläuterungen zur genauen Vorgehensweise im Physikunterricht der Oberstufe verfügbar, aber bereits aus Kompetenzen zur Grundbildung im Rahmenplan erkennt man, dass Schülerexperimente sehr gut geeignet sind, diese Kompetenzen zu vermitteln.

Im Curriculum des Gymnasiums hat sich im Laufe der Zeit durch gegenseitige Beeinflussung von Unterrichtspraxis, Lehrplänen und Schulbüchern eine gewisse traditionelle Vorgehensweise manifestiert, die sich an der historischen Entwicklung der Quantenphysik und den im Unterricht realisierbaren Experimenten orientiert (vgl. Dorn & Bader 2001, S. 236-295). Sie gliedert sich in die Abfolge Photoeffekt, h -Bestimmung, Photonen, Röntgenstrahlen, Comptoneffekt, Wahrscheinlichkeiten und Welle-Teilchen-Problematik, Elektronenbeugung, Unbestimmtheitsrelation und Deutungsfragen. Dabei wird das Doppelspaltexperiment mit abgeschwächtem Laserlicht

zur Herleitung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation verwendet und der Welle-Teilchen-Dualismus durch Vergleichen des Doppelspalt-Interferenzmusters mit Modellen der klassischen Physik kurz diskutiert (vgl. Dorn & Bader 2001, S. 248f).

Seit den achtziger Jahren wurden umfangreiche Studien über Schülervorstellungen zur Quantenphysik durchgeführt. Die zahlreichen unter anderen von Borrmann, Bethge und Mashhadi durchgeführten Studien befassen sich mit den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Atommodell, zur Stabilität, zur Wahrscheinlichkeit, zur Natur des Lichts, zu Teilchen und dem Unterschied zwischen klassischen Objekten und Quantenobjekten. Diese Studien zeigen, dass bei vielen Schülerinnen und Schülern die Vorstellung von Elektronen als Teilchen mit meist kugelförmiger Gestalt dominiert (vgl. Borrmann 1987; Kircher et al. 2009, S. 461f). Mit der Vorstellung, Elektronen seien kleine Kügelchen ist das Zustandekommen eines Interferenzmusters jedoch nicht einfach zu erklären. Aus diesem Grund muss im Unterrichtsgang besonders auf die Entwicklung einer adäquaten Teilchenvorstellung geachtet werden. Dies bedeutet, dass bei der Konzeption des Doppelspaltexperiments besonders auf eine klare fachliche Darstellung des Teilchenbegriffs geachtet werden muss, um Fehlvorstellungen von vornherein zu vermeiden bzw. entgegen zu wirken.

Im Physikunterricht wird meist die Wahrscheinlichkeitsdichte als Darstellung gewählt. Bethge und Mashhadi (vgl. Bethge 1992; Mashhadi & Woolnough 1999, S. 511) haben in ihren Untersuchungen herausgefunden, dass viele Schülerinnen und Schüler auch nach dem Quantenphysikunterricht erhebliche Probleme haben, das Konzept von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und ihre Vorstellungen vom Bahnbegriff zu vereinen. Eine überwiegende Anzahl von Schülerinnen und Schüler erklärt auch nach dem Quantenphysikunterricht die Stabilität der Atome mit Fliehkräften bzw. der Kreisbewegung der Elektronen auf Bahnen. Den Schülern ist das Konzept der Aufenthaltswahrscheinlichkeit zwar bekannt, aber es wird lediglich als Kalkül in ausgewählten Aufgaben der Quantenphysik akzeptiert und verwendet, jedoch werden in anderen Bereichen weiterhin die bisher bekannten Bahnmodelle genutzt und es wird keine einheitliche quantenmechanische Teilchenvorstellung angestrebt.

Um solche Fehlvorstellungen und konzeptionelle Probleme zu vermeiden, sind in den letzten Jahren zahlreiche reformierte Unterrichtsvorschläge publiziert worden. Nachfolgend werden die didaktischen Einsatzmöglichkeiten des Doppelspaltexperiments exemplarisch anhand eines aktuellen Unterrichtskonzepts analysiert.

3.2 Abwandlungen des traditionellen Konzepts zur Quantenphysik

Seit den späten siebziger Jahren sind zahlreiche alternative Konzepte für Quantenphysikkurse in der Schule entwickelt worden. Eine Durchsicht, der in der aktuellen Fachliteratur zur Physikdidaktik (Kircher et al. 2009, S. 469-478; Mikelskis 2006, S. 220-227) genannten Unterrichtsvorschläge zur Quantenphysik ergab, dass die Erkenntnisse vieler älterer Vorschläge als Grundlage in neuere Vorschläge eingeflossen sind und sich die aktuellen Unterrichtsvorschläge zur Quantenphysik bei der Behandlung des Doppelspaltexperiments nur wenig unterscheiden. Kircher und Mikelskis verweisen beide auf das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenphysik.

Um wichtige Anhaltspunkte für die Erstellung des Skripts und der Experimentieranleitung zu bekommen, wird die didaktische Behandlung der Quantenphysik und des Doppelspaltexperiments daher exemplarisch nur im aktuellen Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenphysik untersucht. Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenphysik von 2003/2008 hat sich als Ziele gesetzt, die Gegensätze zur klassischen Physik deutlich aufzuzeigen, klare Begriffe bereitzustellen, die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Anfang an hervorzuheben sowie das Nichtbesitzen von Eigenschaften und den quantenmechanischen Messprozess zu thematisieren. Denn in der Quantenmechanik besteht ein Unterschied zwischen "eine Eigenschaft haben" und "eine Eigenschaft messen" (vgl. Müller 2008, S. 20).

Das Münchener Konzept identifiziert vier Wesenszüge der Quantenphysik: statistische Vorhersagbarkeit, Fähigkeit zur Interferenz, eindeutige Messergebnisse und Komplementarität.

Der Kurs gliedert sich in einen qualitativen Basiskurs, der sich mit den Deutungsfragen der Quantenphysik beschäftigt, und einen quantitativen Aufbaukurs, der erste Einblicke in die formalen Strukturen der Quantenmechanik gibt. Da es in dieser Arbeit nur um eine qualitative Herangehensweise an die Quantenphysik geht, beschränken sich die Analysen auf den Basiskurs, der sich aus zwei Teilen zusammensetzt, die jeweils spiralartig durchlaufen werden. Der erste Durchgang beginnt mit dem Verhalten von Photonen und behandelt Photoeffekt, Präparation ("Besitzen" und "Nicht-Besitzen" von Eigenschaften), Wellen- und Teilchenverhalten von Photonen,

der Ortseigenschaft von Photonen und der Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Im zweiten Durchgang des Basiskurses werden Elektronen betrachtet und die Themen Elektronenbeugung, Wellenfunktion Ψ und deren Wahrscheinlichkeitsinterpretation, der quantenmechanische Messprozess, Komplementarität und Schrödingers Katze sowie die Heisenbergsche Unschärferelation behandelt. Eine Umsetzung dieses Konzepts findet sich zum Beispiel in der Kuhn-Schulbuchreihe (vgl. Kuhn 2000, S. 298-345).

Die Durchführung realer Doppelspaltexperimente mit einzelnen Quantenobjekten ist in der Schule nur schwer zu realisieren. Die Beschaffung mehrerer Apparaturen, um Schülerexperimente in kleinen Gruppen durchführen zu können, wäre sehr aufwändig und würde den finanziellen Rahmen einer physikalischen Sammlung in der Schule sprengen. Aus diesem Grund verwendet das Münchner Konzept eine Computersimulation des Doppelspaltexperiments statt realer Doppelspaltexperimente (vgl. Müller 2003, S. 120).

Mit Blick auf das spätere allgemeine Verständnis der Schülerinnen und Schüler vom Experimentieren ist der Einsatz von Simulationen kritisch zu hinterfragen, denn sonst könnte auch bei späterem Einsatz von Computern in anderen Experimenten möglicherweise sogar der Eindruck entstehen, der Computer allein generiere irgendwelche Messwerte (vgl. Berger 2006, S. 158f, S. 164). Der Computereinsatz ist laut Berger nur sinnvoll, wenn die Schülerinnen und Schüler die routinemäßigen Fähigkeiten und Fertigkeiten des Experimentierens schon beherrschen und eindeutig klar ist, dass der Computer lediglich zur Optimierung der Messwernerfassung eingesetzt wird. Daher ist der Einsatz realer Experimente in den meisten Fällen zu bevorzugen.

Das Doppelspaltexperiment in Schulbüchern

Um eine mögliche Einbettung des Doppelspaltexperiments und die möglichen Kontexte im Unterricht zu geben, stelle ich exemplarisch die Behandlung des Doppelspaltexperiments in Metzler Physik (vgl. Grehn & Krause 1998, S. 382-399) vor. Metzler folgt eher dem traditionellen Curriculum, behandelt zuerst den lichtelektrischen Effekt, das Plancksche Wirkungsquantum und den Compton-Effekt bevor am Doppelspalt Überlegungen zur *Intensitätsverteilung der Photonen* angestellt werden. Im Folgenden wird durch weitere Überlegungen im Absatz *Photonenverteilung bei*

geringer Intensität die Wahrscheinlichkeitsdichte hergeleitet. Im nächsten Textabschnitt *Ausbreitung von Elektronen* werden De-Broglie-Wellen und die Welleneigenschaften von Elektronen behandelt bevor im Unterkapitel *Quantenphysik und klassische Physik* durch eine einheitliche Beschreibung durch Wahrscheinlichkeitsdichten zum Unschärfeprinzip und dem Welle-Teilchen-Dualismus sowie letztendlich die Wellenfunktion $\Psi(\mathbf{x}, t)$ und die Antreffwahrscheinlichkeit $|\Psi(\mathbf{x}, t)|^2$ behandelt, um im letzten Unterkapitel abschließend *Interpretationsprobleme der Quantenphysik* zu erläutern. Das quantenphysikalische Atommodell und die Lösungen der Schrödingergleichung werden dann im folgenden Kapitel Atomphysik behandelt.

Das Doppelspaltexperiment wird in Metzler Physik nur rein informativ eingesetzt. Der Aufbau des Experiments wird gezeigt und das Ergebnis wird ohne detailliertere Behandlung besprochen. Das Doppelspaltexperiment wird hier also nur rein informativ verwendet. Direkte Erfahrungen der Schüler mit der Durchführung des Doppelspaltexperiments und den Ergebnissen sind nicht möglich. Ein Schülerexperiment bietet an dieser Stelle den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit vielseitige Erfahrungen zu sammeln, die im folgenden Abschnitt untersucht werden.

3.3 Experimente im naturwissenschaftlichen Unterricht

Unter einem Experiment versteht man ein objektives und wiederholbares Verfahren zur Erkenntnisgewinnung (vgl. Kircher et al. 2009, S. 244). Diese Rolle zur Erkenntnisgewinnung haben Experimente vorzugsweise in der naturwissenschaftlichen Forschung. Im naturwissenschaftlichen Unterricht hingegen verfolgt man mit Experimenten auch didaktische Absichten, wie zum Beispiel die Veranschaulichung naturwissenschaftlicher und technischer Zusammenhänge oder die Übung des Umgangs mit physikalischen Geräten und Phänomenen. In der Literatur zur Naturwissenschaftsdidaktik wird der Begriff "Experiment" teilweise nicht genau gegen den Begriff "Versuch" abgegrenzt und beides nebeneinander für die Methode "Experiment" als Verfahren zur naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung verwendet (vgl. Berger 2006, S. 149). In allen im Rahmen dieser Arbeit zu erstellenden Texten wird zur Vermeidung von Unklarheiten nur der Begriff "Experiment" verwendet.

Experimente können im Unterricht sehr viele verschiedene Funktionen haben (vgl. Engeln 2006, S. 170). Diese vielfältigen Funktionen von Experimenten lassen sich in vier Ebenen einordnen: die pädagogische, psychologische, wissenschafts- und erkenntnistheoretische sowie die fachliche Funktion (vgl. Berger 2006, S. 151). Pädagogisch können Experimente dazu beitragen, bei den Schülerinnen und Schülern Qualifikationen und Kompetenzen zu entwickeln, zum Beispiel die Entwicklung von Kooperation und Kommunikationsfähigkeit, Förderung von Selbsttätigkeit und Verantwortung, Erziehung zur Kritik und Reflexionsfähigkeit, Ausbau von praktischen Fertigkeiten und Handlungskompetenz. Psychologisch können Experimente Schülerinnen und Schüler motivieren, Interesse wecken und Einstellungen, Anschauungen und Vorstellungen sowie logische Denk- und Lösungsstrategien entwickeln helfen. Darüber hinaus können Experimente das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten fördern, primäre Erfahrungen vermitteln, das Erkennen von allgemeinen physikalischen Prinzipien und invarianten physikalischen Größen schulen, in die naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweise einführen und eine sach- und problembezogene rationale Argumentation fördern. Wissenschafts- und erkenntnistheoretisch können Experimente den Bezug zu wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen herstellen und das Experiment als Methode im Erkenntnisprozess thematisieren. Fachlich können Experimente die Begriffsbildung, Herleitung von Gesetzen sowie die Entwicklung von grundlegenden Konzepten und Theorien unterstützen. Experimente werden hierbei zur Erforschung, Überprüfung und Verfestigung von Wissen eingesetzt. Zum Beispiel können Experimente durch praktisches Tun und durch multiple Zugänge die Lerneffektivität erhöhen, als Erinnerungshilfe an Fakten und Prinzipien fungieren sowie eine Verbindung von Theorie und Empirie herstellen.

Aus der Vielzahl der mit realen Experimenten zu vermittelnden Inhalte und individuellen Kompetenzen folgt, dass die reale Durchführung von Experimenten durch die Schülerinnen und Schüler generell Simulationen oder theoretischen Abhandlungen in Schulbüchern vorzuziehen ist, wenn bestimmte Bedingungen und Anforderungen erfüllt sind, die im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden.

Anforderungen für effektiven Einsatz von Experimenten

Nun stellt sich die Frage, welche Anforderungen an die Lernumgebung gestellt werden, um einen effektiven Einsatz von Experimenten zu ermöglichen. Eigene "Forschung" durch die Schülerinnen und Schüler setzt voraus, dass die Schülerinnen und Schüler in der naturwissenschaftlichen Methode geübt sind und die Lehrkraft im Unterricht genügend Möglichkeiten für Hypothesenbildung, Argumente und Experimentiervorschläge der Schülerinnen und Schüler lässt (vgl. Engeln 2006, S. 171).

Empirische Bestandsaufnahmen zur Unterrichtsrealität (vgl. Tesch & Duit 2004, S. 67) zeigen, dass Anregungen und Konzepte aus der naturwissenschaftsdidaktischen Fachliteratur zur Einrichtung stärker experimentell basierter Lernumgebungen nur selten umgesetzt werden. Oft wird eine Steigerung des Interesses und Förderung wissenschaftlichen Arbeitens durch praktisches Arbeiten unterstellt, was aber in der Realität nicht automatisch der Fall ist. Schülerinnen und Schüler erfahren zwar grundsätzlich die freieren Aktionen und Interaktionen im Labor sowie das selbstbestimmte Lerntempo positiv, die große Diskrepanz zwischen der besonderen Situation im Labor und ihren Alltagserfahrungen wird jedoch von den Schülerinnen und Schülern negativ bewertet. Motivierend wirkt sich nur Laborarbeit mit Erfolgserlebnissen aus, ansonsten ist ihre Wirkung eher demotivierend. Engeln stellt nach einer Analyse der empirischen Fachliteratur auch fest, dass Laboraktivitäten entgegen der gebräuchlichen Meinung nicht automatisch wissenschaftliche Arbeitsweisen fördern. Schülerinnen und Schüler halten das Befolgen detaillierter kochrezeptartiger Anleitungen für die wissenschaftliche Arbeitsweise, während ihre Aktivitäten nur wenig geplant und reflektiert werden. Engeln formuliert dieser Erkenntnis folgend Forderungen an die Lernumgebung zum effektiven Einsatz von Experimenten (vgl. Engeln 2006, S. 172): Experimente sollten Herausforderungen darstellen und Ziel und Zweck der Experimente müssen für die Schülerinnen und Schülern transparent sein. Es sollen keine kochbuchartigen Rezepte als Experimentieranleitung umgesetzt werden. Die Experimente müssen funktionieren und so den Schülerinnen und Schülern Kompetenzerlebnisse vermitteln.

Schülerexperimente sind außerdem nicht von sich aus authentisch und geben einen Einblick in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen, sondern es muss den Schülerinnen und Schülern genügend Raum für eigene Einfälle gelassen werden. Einen zweck-

mäßigen Einblick in authentische Wissenschaft geben, neben den "echten" Experimenten, wenn auch in geringerem Maße, auch Fallstudien, Simulationen und der direkte Kontakt mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Authentisches Vorgehen in der Wissenschaft lernen die Schülerinnen und Schüler ebenfalls dadurch kennen, dass man sie ermutigt, die Ergebnisse ihrer Experimente zu diskutieren und öffentlich zu präsentieren. Auf diese Weise wird das konzeptionelle und das prozedurale Lernen der Schülerinnen und Schüler unterstützt und sie erlangen Sicherheit in der Verwendung der Fachsprache (vgl. Engeln 2006, S. 174).

Bezogen auf die Konzeption des Doppelspaltexperiments als Schülerexperiment am Institut für Laserphysik der Universität Hamburg, ist also darauf zu achten, dass den Schülerinnen und Schülern die Gründe für die Durchführung des Experiments klar erfasst haben und genügend Raum für eigene Entscheidungen lassen, dass keine kochbuchartigen Rezepte umgesetzt werden.

Zur Vermeidung von Lernschwierigkeiten muss bei der Konzeption des Doppelspaltexperiments als Schülerexperiment besonders auf die Entwicklung einer adäquanten Teilchenvorstellung geachtet werden. Hierzu sollten die Gegensätze zur klassischen Physik deutlich aufgezeigt werden, klare Begriffe bereitgestellt werden und die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Anfang an hervorgehoben werden.

Eines der Ziele des Kooperationsprogramm-"Light und Schools" ist den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in authentische Wissenschaft zu geben. Dies kann neben dem direkten Kontakt mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auch dadurch vermittelt werden, dass man die Schülerinnen und Schüler ermutigt die Ergebnisse ihrer Experimente zu diskutieren und öffentlich zu präsentieren

4 Das Doppelspaltexperiment

Dieses bereits in Kapitel 2 beschriebene Experiment wurde in den letzten Jahren in vielfacher Weise mit den verschiedensten Objekten wie Elektronen, Neutronen (vgl. Zeilinger et al., 1988), Atomen, Fulleren-Molekülen C_{60} , C_{70} (vgl. Arndt et al., 1999) und sogar mit Biomolekülen (vgl. Hackermüller et al. 2003) durchgeführt. Dabei zeigte sich in eindrucksvoller Weise, dass sowohl mit Objekten, denen man offensichtlich Wellencharakter zuschreibt, aber auch mit Objekten, denen man gewöhnlich einen Teilchencharakter zuschreibt, Interferenzphänomene wie beim Experimentieren mit kohärentem Licht auftreten. Dies bedeutet, dass eine Unterscheidung in "Welle" und "Teilchen" keinen Sinn macht und deshalb aufgegeben werden muss zugunsten einer einheitlichen Beschreibung als Quantenobjekt, das sich nach den Regeln der Quantenmechanik verhält.

In diesem Kapitel werden die technischen Möglichkeiten der beschafften TEACHSPIN-Apparatur zur Durchführung des Doppelspaltexperiments analysiert. Eine detaillierte Experimentieranleitung befindet sich im Schülerskript, das im Anhang A1 beigelegt ist. Messprotokolle von Probemessungen befinden sich im Anhang A3. Eine Dokumentation des LABVIEW-Messprogramms ist im Anhang A4 angelegt.

4.1 Apparative Grundlagen des Doppelspaltexperiments

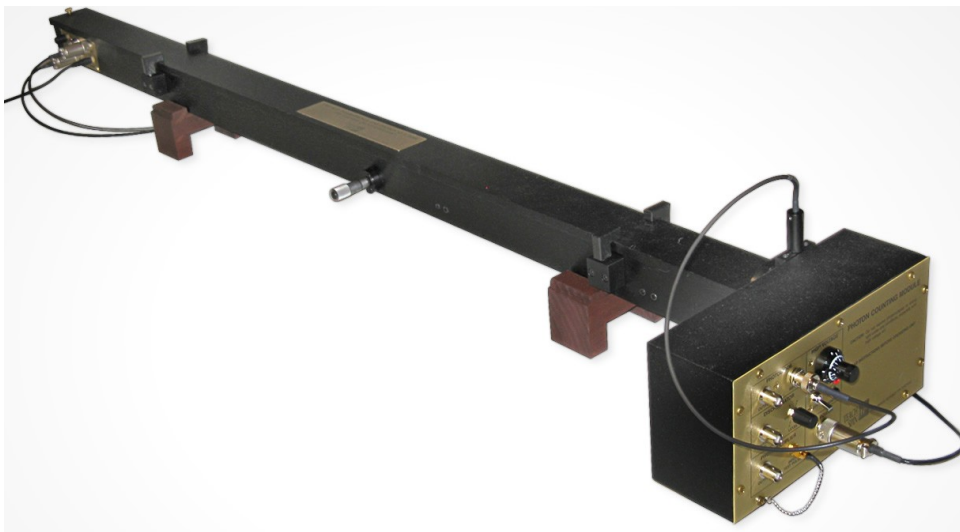


Abbildung 4.1: TEACHSPIN Two-Slit Interference, One Photon at a time

Die Apparatur zur Durchführung des Doppelspaltexperiments mit einzelnen Photonen wurde als betriebsfertiger Aufbau von der Firma TEACHSPIN in Buffalo/USA erworben (siehe Abbildung 4.1).

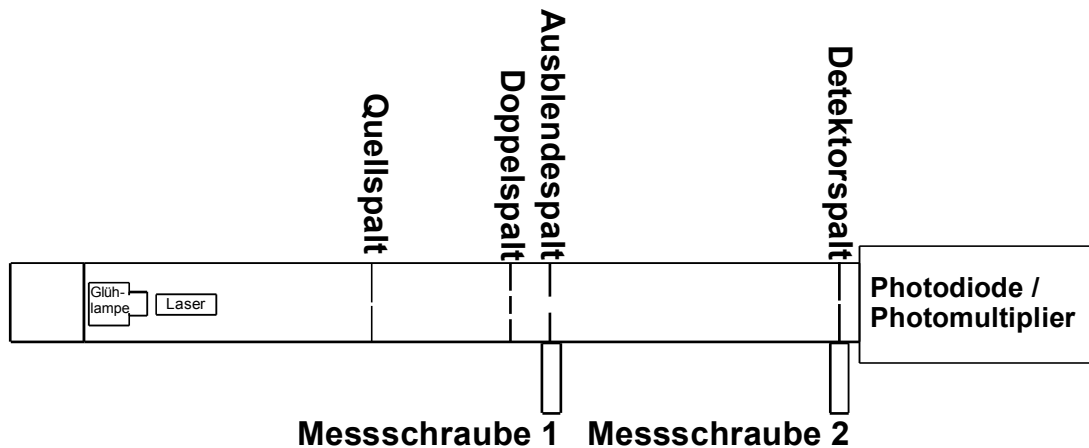


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau der TEACHSPIN-Apparatur

Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau des Experiments, der die Abmessungen ca. 130 cm \times 23 cm \times 11 cm hat. Die Spannungsversorgung und Lichtquellen sind links untergebracht, rechts befindet sich die Detektoreinheit mit Photodiode und Photomultiplier. Lichtquellen und Detektoreinheit sind verbunden durch einen abdeckbaren Kanal aus einem u-förmigen Aluminiumprofil, in dem sich die Halterungen für die verschiedenen Spalte befinden.

Lichtquellen

Zur Justage der Spalte und für die Messungen im ersten Teil (A) des Experiments wird ein roter Laser ($\lambda = 670\text{nm}$, Leistung 5mW) verwendet (vgl. TeachSpin 2007, S. 9). Nachdem alle Messergebnisse für die Interferenz mit Laserlicht erfasst sind kann vom roten Laser als Quelle auf die wesentlich schwächer leuchtende grün gefilterte Glühlampe umgeschaltet werden.

Die Bedienelemente zum Umschalten zwischen Laser und Glühlampe (LASER-OFF-BULB) und



Abbildung 4.3: Linkes Bedienfeld

zur Regelung der Helligkeit der Glühlampe (BULB POWER) befinden sich am linken Ende der Apparatur (siehe Abbildung 4.3).

Der Photomultiplier wird nur dann mit Spannung versorgt, wenn die Glühlampe (BULB) als Lichtquelle ausgewählt ist.

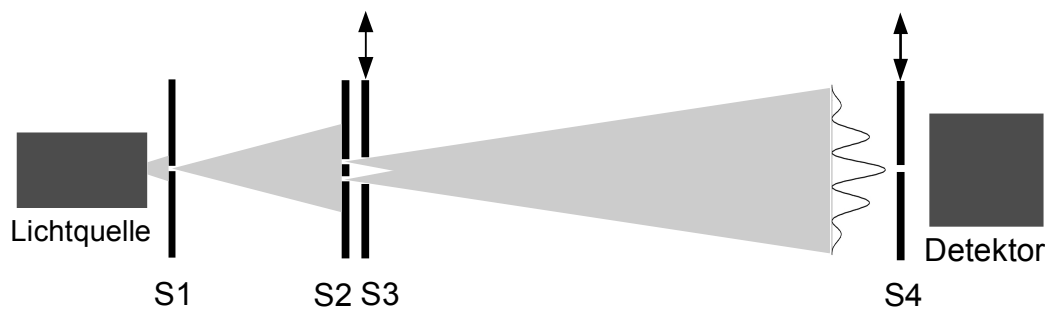


Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau des Doppelspaltexperiments

Spalte

Die verwendeten Spalte sind ca. 2×2 cm große Metallplättchen, die mit einer magnetischen Folie beklebt sind, wodurch eine einfache Montage und Justage ermöglicht wird. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, ist darauf zu achten, dass die Ausrichtung der Spalte immer möglichst senkrecht erfolgt.

Der Apparatur sind folgende Spalte beigelegt:

Stückzahl	Objekt	Spaltbreite	Spaltabstand
2	Einzelspalt	0,085 mm	---
1	Einzelspalt	1,000 mm	---
1	Doppelspalt	0,085 mm	0,353 mm
1	Doppelspalt	0,085 mm	0,406 mm
1	Doppelspalt	0,085 mm	0,457 mm

Abbildung 4.4 zeigt den schematischen Aufbau des Experiments mit den Spaltpositionen (S1) - (S4). Um eine möglichst punktförmige Quelle zu erhalten, lässt man das Licht der Lichtquelle zuerst auf einen "Quellspalt" (S1). Es handelt sich hierbei um einen Einzelspalt mit der Spaltbreite von 0,085 mm.

Im weiteren Strahlverlauf befindet sich ein Doppelspalt (S2). Die Breite der Spalte beträgt immer 0,085 mm und es stehen drei Doppelspalte mit den Spaltabständen 0,353 mm, 0,406 mm und 0,457 mm zur Verfügung.

Wenige Millimeter hinter dem Doppelspalt befindet sich ein horizontal verschiebbarer "Ausblendespalt" (S3) mit der Spaltbreite von ca. 1 mm. Mit dem Ausblendespalt lässt sich jeweils einer oder sogar beide Spalte des Doppelspalts verdecken bzw. ausblenden.

Am rechten Ende der Apparatur befindet sich der "Detektor-Spalt" (S4). Es handelt sich hierbei um einen horizontal verschiebbaren Einzelspalt mit der Spaltbreite 0,085 mm. Eine Mikrometerschraube erlaubt es, den Detektor-Spalt definiert in der horizontalen Ebene zu verschieben, so dass immer nur ein kleiner Anteil des sich an Position "S4" ergebenden Bildes auf den Detektor weitergeleitet wird.

Detektor

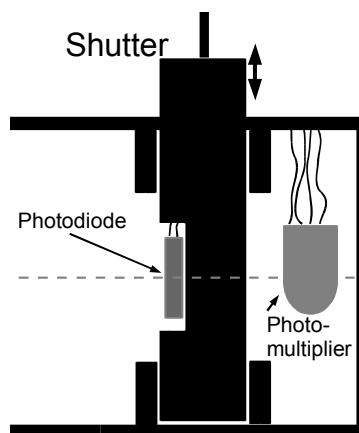


Abbildung 4.5: Shutter/Detektor

Am rechten Ende der Apparatur befinden sich, wie in Abbildung 4.4 gezeigt, kurz hinter dem Detektorspalt (S4) die in Abbildung 4.5 detailliert dargestellt, der Shutter und der Detektor.

Bei geschlossenem Shutter fällt das Messlicht der Lichtquelle auf die Photodiode. Bei geöffnetem Shutter fällt das Messlicht der Lichtquelle auf den Photomultiplier.

Photodioden sind Halbleiter-Dioden, die einfallendes Licht in einen elektrischen Strom umwandeln. Dieser Photostrom wird in einem Verstärker zu einem Spannungssignal umgewandelt, welches dann linear proportional zum Lichteinfall ist.

Das aus dem Shutter herausragende Kabel verbindet die Photodiode mit der Buchse PHOTODIODE-INPUT des Verstärkers am rechten Bedienfeld (siehe Abbildung 4.6). An der Buchse PHOTODIODE-OUTPUT kann mit einem Voltmeter die zum Lichteinfall proportionale Spannung gemessen werden.

Für die Messungen mit dem Photomultiplier als Detektor muss am linken Bedienfeld auf Glühlampe (BULB) als Lichtquelle umgeschaltet werden.



Abbildung 4.6: Rechtes Bedienfeld

Für genaue quantitative Messungen ist jegliches Umgebungslicht abzuschirmen, so dass nur das eigentliche Messlicht auf den Detektor gelangt. Aus diesem Grund müssen die Messungen bei geschlossener Messapparatur durchgeführt werden.

Am Regler HIGH-VOLTAGE am rechten Bedienfeld kann über ein 10-gängiges Potentiometer die Hochspannung für die Dynoden des Photomultipliers geregelt werden. Erste Impulse sind bei einer Spannung von 400-500V zu hören. Das Ausgangssignal des Photomultipliers liegt an der Buchse PHOTOMULTIPLIER-OUTPUT an.

Mit einer Diskriminatorschaltung lassen sich bestimmte Signalwerte ausblenden. In die Apparatur ist ein Schwellendiskriminator eingebaut, der am Ausgang DISKRIMINATOR OUTPUT-TTL einen Normimpuls von +4V liefert, wenn der Eingangsimpuls ein am Drehregler DISCRIMINATOR-LEVEL (siehe Abbildung 4.6) gewähltes Spannungsniveau überschreitet. Die genauen Auswirkungen des Diskriminators auf das Messsignal wird im Schülerskript detailliert erklärt und graphisch verdeutlicht.

4.2 Didaktische Überlegungen zum Doppelspaltexperiment

Das Doppelspaltexperiment gilt als eines der wichtigsten Experimente der Quantenmechanik, weil es den dualen Charakter von Objekten offenbart und hat damit das Bild von der Struktur der Materie grundlegend verändert. Mit dem Doppelspaltexpe-

riment lassen sich eindrucksvoll Interferenzphänomene mit verschiedenen Objekten durchführen, denen man üblicherweise nur Wellencharakter oder nur Teilchencharakter zuschreibt. Die auftretenden Phänomene sind jedoch in beiden Fällen sehr ähnlich und verdeutlichen den Schülerinnen und Schülern damit die Begrenztheit der üblichen Beschreibung. Hierdurch wird die Notwendigkeit einer neuen Erklärung durch eine neue einheitlichen Theorie im Rahmen der Quantenmechanik sichtbar.

Mit dem Einbinden des Doppelspaltexperiments in das "Light and Schools"-Programm am Institut für Laserphysik sollen Schülerinnen und Schüler an ausgewählte Aspekte der Quantenphysik herangeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen durch die Resultate des Doppelspaltexperiments erfahren, dass Interferenzphänomene sowohl bei Objekten mit offensichtlichem Teilchencharakter, als auch bei Objekten mit offensichtlichem Wellencharakter auftreten und daher neue Konzepte zur Beschreibung dieser Objekte notwendig erforderlich sind. Eine einheitliche Beschreibung dieser Phänomene erfolgt durch die Quantenmechanik durch Einführung einer Wahrscheinlichkeitsamplitude, die eine Welle ist, und die die Wahrscheinlichkeit bestimmt, Teilchen an einer bestimmten Stelle nachzuweisen.

Bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments sollen die Schülerinnen und Schüler mit physikalischen Geräten, Apparaturen und dem Experimentieren nach der wissenschaftlichen Methode vertraut gemacht werden um so ihre praktischen Fähigkeiten und ihre Handlungskompetenz zu steigern sowie ihre Selbständigkeit zu fördern. Eine Einweisung in die Bedienung der physikalischen Geräte erhalten die Schülerinnen und Schüler durch den Betreuer, aber viele Informationen werden bereits im Schülerskript bei der Beschreibung der einzelnen Geräte und Komponenten des Doppelspaltexperiments gegeben.

Die Schülerinnen und Schüler sollen durch die erfolgreiche Durchführung eines Schülerexperiments, das die Notwendigkeit eines neuen Konzepts für die Vorstellungen von der Struktur der Materie demonstriert, motiviert werden, sich weitere Inhalte selbstständig zu erarbeiten. Um Fehlvorstellungen der Schülerinnen und Schüler bezüglich naturwissenschaftlicher Forschung entgegen zu wirken, wird im Schülerlabor am Institut für Laserphysik ein Einblick in echte Forschungslabore mit realen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ermöglicht. Manche Schüler denken Forscher seien immer alte Männer mit langen Bärten in weißen Kitteln.

Bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments im Schülerlabor "Light and Schools" wird den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geboten, im ersten Teil, beim Doppelspaltexperiment mit Laserlicht (3A in der Experimentieranleitung, Anhang A1), ihr bisheriges Wissen in Strahlen- und Wellenoptik zu nutzen um die auftretenden Phänomene zu erklären. Im zweiten Teil beim Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen (3B in der Experimentieranleitung, Anhang A1) stellen die Schülerinnen und Schüler fest, dass die beobachteten Phänomene mit den bisherigen Teilchenvorstellungen nicht erklärt werden können. Hierdurch soll ein Konzeptwechsel in den Teilchenvorstellungen der Schülerinnen und Schüler hin zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation bekräftigt werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen nach Durchführung des Experiments und Nachbereitung in der Lage sein, die Konzepte Welle-Teilchen-Dualismus und Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenmechanik korrekt anzuwenden.

Mit der Durchführung des Doppelspaltexperiments können die Schülerinnen und Schüler ihre Strategien der Erkenntnisgewinnung erweitern, indem sie bisher bekannte Modelle verwenden und diese modifizieren oder neue hinzu kommen. Bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments, dass die Begrenztheit der vorher bekannten klassischen Theorien zeigt, erfahren die Schülerinnen und Schüler, dass naturwissenschaftliche Experimente Ausgangspunkt für neue Ideen sein können und so auch eine grundlegende Funktion in Bezug auf die Entwicklung neuer Theorien haben.

Bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments und im Schülerskript werden die Schülerinnen und Schüler mit der Fachsprache im Bereich Strahlen- und Wellenoptik sowie deren sachgerechte Anwendung konfrontiert. Da das Schülerexperiment in kleinen Gruppen durchgeführt wird, kommt es auch auf Kooperation und Kommunikationsfähigkeit im Team an (z.B. beim Festlegen frei wählbarer Messparameter und bei der Deutung und Erklärungsversuchen der beobachteten Phänomene). Bei der Präsentation ihrer Ergebnisse und dem gemeinsamen Entwickeln des Konzepts der Wahrscheinlichkeitsamplitude, zusammen mit dem Betreuer, werden die relevanten neuen fachsprachlichen Begriffe verwendet und ihre sachgerechte Verwendung geübt.

4.3 Konzept des Schülerskripts und der Experimentieranleitung

Nachdem in den vorangehenden Kapiteln sowohl die mit dem Doppelspaltexperiment zu vermittelnden Inhalte und Kompetenzen analysiert, als auch die technischen Möglichkeiten und Anforderungen an einen effektiven Einsatz von Schülerexperimenten untersucht wurden, ist es nun möglich, die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse in die Konzeption des Schülerskripts einfließen zu lassen.

Der Einstieg zur Quantenphysik und dem Doppelspaltexperiment beginnt, wie im Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenphysik, mit Photonen. Zu Anfang des Skripts werden die wesentlichen Fakten zum Teilchencharakter von Licht zusammengefasst und die zugehörigen Begriffe zur Quantisierung der Energie wieder in Erinnerung gerufen sowie der Impuls eines Photons relativistisch hergeleitet. Danach wird in einem hypothetischen Doppelspaltexperiment mit massiven Kugeln der statistische Charakter der Messungen und die Quantisierung der Messergebnisse erarbeitet, bevor im Folgenden anhand des Doppelspaltexperiments mit Wasserwellen das Zustandekommen der Interferenz mit dem Wellenmodell entwickelt wird. Die resultierende Amplitude für verschiedene Gangunterschiede wird als Wiederholung grafisch dargestellt und beschrieben. Danach wird mit der offenen Fragestellung "Was passiert wenn man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen durchführt?" zum Experiment übergeleitet.

Die Beschreibung der Experimentieranordnung beginnt zunächst mit einem schematischen Diagramm, damit die Schülerinnen und Schüler sich mit der wirklichen Realisierung des Experiments und den realen Geräten auseinandersetzen.

Nach Beschreibung der Lichtquellen und den Laser-Sicherheitshinweisen werden Aufbau und Funktion der weiteren Komponenten der Apparatur vorgestellt. Hierbei wird die Funktion eines Teils jeweils immer so detailliert beschrieben, dass durch das Wissen um die Funktion der Komponente Bedienungsfehler vermieden werden und der Messvorgang nachvollziehbar ist. Die Anordnung der Spalte wird ebenfalls nur schematisch gezeigt, damit die Schülerinnen und Schüler in der Gruppe gemeinsam die entsprechenden Spalte und Positionen auswählen und justieren können. Die Funktion der Photodiode und des Photomultipliers kann im Detail nicht allgemein vorausgesetzt werden, daher werden Aufbau und Funktion beider Komponenten ausführlich im Schülerskript beschrieben.

Um sicherzustellen, dass die Funktion des Diskriminators klar ist, wurde der Signalverlauf vorher/nachher in einem Diagramm veranschaulicht. Die Benutzeroberfläche des LABVIEW-Messprogramms wird mit allen Teilschritten dargestellt. Die theoretischen und apparativen Grundlagen schließen mit Fragen zum Verständnis des Messverfahrens und der Bedienung der Komponenten ab. Die Antworten können die Schülerinnen und Schüler anhand des Skripts und aufgrund ihres Vorwissens selbstständig erarbeiten.

Das Experiment wird von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts für Laserphysik der Universität Hamburg betreut, dieser unterstützt die Schülerinnen und Schüler bei der Durchführung des Experiments und ist Ansprechpartner für alle Fragen der Schülerinnen und Schüler zum Doppelspaltexperiment.

Bei der Experimentieranleitung wurde auf kurze klare Anweisungen geachtet, die teilweise einen Rückgriff auf Theorie und Gerätebeschreibungen im Skript erfordern.

Einzelne Abschnitte der Experimentieranleitung erfordern es, dass sich die Gruppe auf bestimmte Verfahrensweisen festlegt, die in der Experimentieranleitung nicht näher spezifiziert sind. So zum Beispiel die Zahl der Messpunkte, die Messzeit, das Herausfinden der passenden Stromversorgung von Lautsprecher und Apparatur oder dass die Position des Ausblendespalt für die verschiedenen Positionen notiert werden sollte. Hierdurch soll einem rezeptartigen "Abarbeiten" der Experimentieranleitung entgegengewirkt werden und durch das Offenlassen verschiedener Verfahrensschritte, den Schülerinnen und Schülern Raum für eigene Entscheidungen und Diskussionen in der Gruppe gelassen werden.

In der Experimentieranleitung befinden sich auch Fragen nach dem Verständnis bzw. die zur Reflektion und Interpretation von Ergebnissen auffordern. Probemessungen haben gezeigt, dass die Interferenzeffekte sowohl bei Messungen mit Laserlicht als auch mit einzelnen Photonen signifikant nachweisbar sind. Die Auswertungen der Probemessungen sind im Anhang A3 angefügt. In den Probemessungen zeigt sich, dass die Intensitätsverteilung und der zentrale Wert der Interferenzkurven jeweils mehr als doppelt so groß ist, wie die Summe der Zentralwerte aus den Messungen mit den beiden einzelnen Spalten des Doppelspalts. Um die Schülerinnen und Schüler nicht zu demotivieren, falls ihre Messkurven nicht so sauber gelingen, wurde auf eine Darstellung der Probemessungen in der Nachbereitung verzichtet.

Die Experimentieranleitung endet mit den Fragen nach Erklärungen für die mit Laserlicht und einzelnen Photonen gemessenen Interferenzeffekte und schließt mit dem Arbeitsauftrag, die Ergebnisse und Erklärungsversuche in ihrer Gruppe zu diskutieren und danach dem Betreuer zu präsentieren. In der Nachbereitung analysieren die Schülerinnen und Schüler zusammen mit dem Betreuer die Ergebnisse und Erklärungsversuche der Experimente mit Laserlicht und einzelnen Photonen. Zusammen mit dem Betreuer wird erarbeitet, dass die Interferenz von Laserlicht und die der einzelnen Photonen quantenmechanisch in einer einheitlichen Theorie beschrieben werden kann. Dies geschieht durch Einführung einer Wahrscheinlichkeitsamplitude, die eine Welle ist, und die die Wahrscheinlichkeit bestimmt, Teilchen an einer bestimmten Stelle nachzuweisen beschrieben werden kann.

5 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war Aufbau und Erprobung eines Doppelspaltexperiments mit einzelnen Photonen für Schulen zu diskutieren. Dabei sollten sowohl die technischen, Möglichkeiten des Doppelspaltexperiments, als auch die didaktischen Einsatzmöglichkeiten des Doppelspaltexperiments bei der Vermittlung von Quantenphysik ausgelotet werden.

Hierzu wurden Aufbau und Funktion der von TEACHSPIN/USA angeschafften Apparatur untersucht und mit Blick auf die spätere Konzeption des Schülerskripts dokumentiert. Mit der Apparatur ist es möglich, die Streuung am Doppelspalt und seinen beiden Einzelspalten für zwei verschiedene Lichtquellen (roter Laser oder grün gefilterte Glühlampe) aufzuehmen. Die Interferenzphänomene sind in beiden Fällen durch die Messergebnisse signifikant nachweisbar. Als Detektor dient im Fall des Lasers eine Photodiode, deren Photospannung mit einem Voltmeter gemessen wird. Die einzelnen Photonen der Glühlampe werden mit einem Photomultiplier nachgewiesen.

Zur Erstellung des Skripts wurden außerdem die mit dem Doppelspaltexperiment zu vermittelnden Inhalte und Kompetenzen untersucht. Neben der Analyse der Inhalte gemäß Lehrplan wurden die Einsatzmöglichkeiten des Doppelspaltexperiments in einem aktuellen Unterrichtskonzept untersucht. Das Doppelspaltexperiment ist sehr gut geeignet, das Auftreten von Interferenz bei Objekten mit offensichtlichem Wellencharakter und auch bei Objekten mit offensichtlichem Teilchencharakter zu demonstrieren. Auf diese Weise wird den Schülerinnen und Schüler die Notwendigkeit einer neuen Erklärung verdeutlicht, die die Quantenphysik und ihre Wahrscheinlichkeitsinterpretation liefern. Die Analyse des Münchner Unterrichtskonzepts zur Quantenphysik und weiterer Untersuchungen zu Lernschwierigkeiten beim Lernen von Quantenphysik zeigen, dass klare Begriffe und ein Einstieg über Photonen mit anschließender Behandlung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation, den Schülerinnen und Schülern das Verständnis von Quantenphysik erleichtern.

Abschließend wurden die Möglichkeiten und Anforderungen für einen effektiven Einsatz von Schülerexperimenten im Unterricht untersucht. Den Schülerinnen und Schüler sollten Ziel und Zweck eines Experiments klar sein und es muss noch Raum für eigene Gestaltungsmöglichkeiten der Schülerinnen und Schüler geben. Es dürfen

keine kochbuchartigen Rezepte als zur Durchführung des Experiments umgesetzt werden und die Experimente müssen funktionieren um Erfolgserlebnisse zu vermitteln. Authentisches Vorgehen in der Wissenschaft lernen die Schülerinnen und Schüler auch dadurch kennen, dass man sie ermutigt die Ergebnisse ihrer Experimente zu diskutieren und zu präsentieren. Diese Erkenntnisse sind in die Konzeption des Schülerskripts und der Experimentieranleitung eingeflossen. Da das Schülerexperiment in ca. 3 Stunden durchführbar sein soll, wurde der Fokus für die Durchführung des Doppelspaltexperiments auf die qualitative Demonstration von Interferenz im Wellenkonzept mit Laserlicht und von Interferenz im Teilchenkonzept mit einzelnen Photonen gelegt. Hierzu wird der statistische Charakter der Messungen mit Teilchen hervorgehoben und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation über die Wellenfunktion analog zu klassischen Wellenphänomenen phänomenologisch gewonnen.

Ob und wie weit Nachbesserungen bei der Konzeption des Doppelspaltexperiments als Schülerexperiment am Institut für Laserphysik der Universität Hamburg nötig sind, um den Lernerfolg zu optimieren, könnte eine Evaluation nach mehrmaligen Durchläufen der Schülerexperimente im Rahmen des Kooperationsprogramms-“Light and Schools“ zeigen. Mit Blick auf eine Erweiterung des Kooperationsprogramms auch für die Mittelstufe, könnte man versuchen auch für die Mittelstufe eine qualitative Einführung in das Konzept der Quantenphysik zu geben. Für die Oberstufe könnte eine weitergehende Behandlung der Unschärferelation eingearbeitet werden.

Literaturverzeichnis

- Markus Arndt, O.Nairz, J.Voß-Andreae, C.Keller, G.van der Zouw, A.Zeilinger (1999), *Wave-particel duality of C60 molecules*, Nature Vol.401, p.680-682
- Veit Berger (2006), *Im Unterricht experimentieren*, in Helmut F.Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik 1.Aufl.*, S.149-167, Berlin: Cornelsen Verlag
- Thomas Bethge (1992), *Schülervorstellungen zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik*, in H.Fischler (Hrsg.), *Quantenphysik in der Schule*, , Kiel: IPN
- Malte Bormann (1987), *Das Schülervorverständnis zum Themenbereich "Modellvorstellungen zu Licht und Elektronen"*, in W.Kuhn (Hrsg.), *Didaktik der Physik*, Physikertagung Giessen
- Friedrich Dorn, Franz Bader (2001), *Physik 12/13 Gymnasium Sek II*, Hannover: Schroedel Verlag
- Albert Einstein (1905), *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik 322, S.553-563
- Katrin Engeln (2006), *Praktikum, Lernort Labor*, in Helmt F.Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik 1.Aufl.*, S.167-176, Berlin: Cornelsen-Verlag
- Richard P. Feynman (1992), *Vorlesungen über Physik, Bd.3 Quantenmechanik (dt.-Übersetzung von Henner Wessel) 2.Aufl.*, München: Oldenbourg
- Freie und Hansestadt Hamburg (2009), *Rahmenplan Physik, Bildungsplan Gymnasiale Oberstufe vom 1.8.2009*, Hamburg: Behörde für Schule und Berufsbildung
- Joachim Grehn und Joachim Krause (Hrsg.) (1998), *Metzler Physik 3.Aufl.*, Braunschweig: Bildungshaus Schulbuchverlage Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers
- Lucia Hackermüller, S. Uttenthaler, K. Hornberger, E. Reiger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt (2003), *The Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes*, Phys. Rev. Lett. 91 No. 9, 090408
- Heinrich Hertz (1888), *Über elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion*, Annalen der Physik und Chemie Vol. 270 Issue 8 34, S. 609-623
- Ernst Kircher, Raimund Girwidz, Peter Häußler (2009), *Physikdidaktik - Theorie und Praxis 2.Aufl.*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- Wilfried Kuhn (2000), *Physik 2, Sekundarstufe II, 1.Aufl.*, Braunschweig: Westermann Verlag
- Azam Mashhadi and Brian Woolnough (1999), *Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities*, Eur. J. Phys. 20, p.511-516
- Helmut Mikelskis (Hrsg.) (2006), *Physik-Didaktik*, Berlin: Cornelsen Verlag
- Rainer Müller (2003), *Quantenphysik in der Schule*, Berlin: Logs Verlag

- Rainer Müller (2008), *Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenphysik*, Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 6/57.Jg. , S.19-25
- Isaak Newton (1687), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Cambridge: Royal Society
- Max Planck (1901), *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, Annalen der Physik 309, S. 553-563
- TeachSpin Inc. (2007), *Two-Slit Interference, One Photon at a Time, Operating Manual (Expanded Version)*, Buffalo/USA: TeachSpin
- Maïke Tesch, Reinders Duit (2004), *Experimentieren im Physikunterricht - Ergebnisse einer Videostudie*, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 10, S.51-69
- Anton Zeilinger, R.Gähler, C.G.Shull, W.Treimer, W.Mampe (1988), *Single and double-slit diffractions of neutrons*, Reviews of Modern Physics Vol.60,No.4, p.1067-1073

Anhang

A1 Schülerskript zum Doppelspaltexperiment

A2 Nachbereitung zum Doppelspaltexperiment

A3 Probemessungen

A4 Dokumentation zum LABVIEW-Messprogramm

Anhang

Anhang A1 Schülerskript zum Doppelspaltexperiment

Anhang A2 Nachbereitung zum Doppelspaltexperiment

Anhang A3 Protokolle von Probemessungen

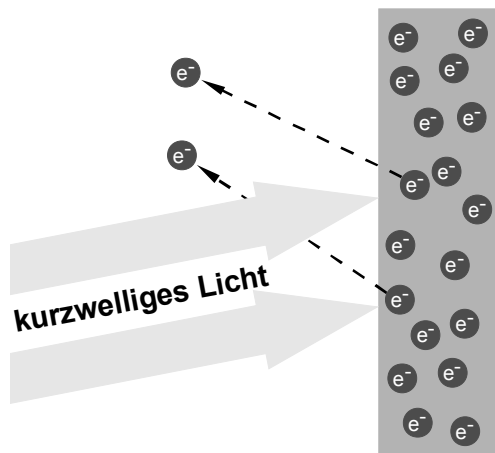
Anhang A4 Dokumentation zum LabView-Messprogramm

Anhang A1 - Schülerskript zum Doppelspaltexperiment

Das Doppelspalt-Experiment

① Physikalische Grundlagen

Was wissen wir über Licht?



Zur Erklärung des photoelektrischen Effekts fasste erstmals Albert Einstein 1905 in seiner Quantenhypothese Strahlung der Frequenz f als Ansammlung von Quanten auf, die sich mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen und jedes Photon als Korpuskel seine Energie $E = h \cdot f$ unverändert beibehält.

Die Naturkonstante h wird auch als Plancksche Konstante oder Wirkungsquantum bezeichnet. Ihr Wert beträgt: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Abbildung 1: Photoeffekt

Da Photonen nur bei Lichtgeschwindigkeit existieren und keine Ruhemasse besitzen, kann man ihnen nach der Relativitätstheorie eine Masse zuschreiben, die sich aus der Energie $E = m \cdot c^2$ ergibt. Analog zum Impuls eines klassischen Teilchens $p = m \cdot v$, folgt für das Photon $p = m \cdot c = \frac{E}{c}$ und mit $E = h \cdot f$ ergibt sich $p = \frac{h \cdot f}{c}$ bzw. $p = \frac{h}{\lambda}$ mit $c = f \cdot \lambda$.

Was passiert beim Doppelspaltexperiment mit massiven Kugeln?

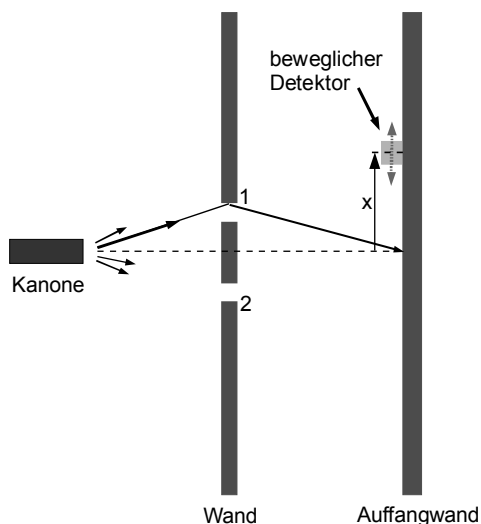


Abbildung 2: Experiment mit Kugeln

Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines Doppelspaltexperiments mit massiven Kugeln, die von einer Kanone (links im Bild) abgeschossen werden. Rechts von der Kanone befindet sich eine Wand aus Stahlplatten mit zwei Löchern. Jedes Loch ist gerade groß genug, um eine Kugel durchzulassen. Hinter der Wand aus Stahlplatten befindet sich in einem Abstand eine Auffangwand aus einem weichen Material, die alle Kugeln absorbiert. Vor der Auffangwand ist ein in x-Richtung verschiebbarer Detektor angebracht, der die in einem bestimmten Zeitintervall im Abstand-x

vom Mittelpunkt auftreffenden Kugeln zählt. Mit dieser Apparatur kann man nun experimentell die Antwort auf die Frage finden: "Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kugel, die durch die Wand geht, im Abstand- x vom Mittelpunkt an der Auffangwand auftrifft?"

Hierzu kann man nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen, denn man kann nicht mit Bestimmtheit sagen, welchen Weg die einzelne Kugel nehmen wird. Mit Wahrscheinlichkeit ist hier die Chance gemeint, dass eine Kugel im Detektor landet. Diese Chance kann man messen, wenn man die Kugeln zählt, die in einer bestimmten Zeiteinheit am Detektor ankommen, und dann das Verhältnis zur Gesamtzahl der, in dieser Zeit an der Auffangwand ankommenden, Kugeln bildet. Betrachtet man in einem Gedankenexperiment die Kugeln idealisiert als unzerstörbar, so kommen die Kugeln an der Auffangwand immer als ganzes zusammenhängendes Objekt an. Abbildung 3 zeigt das erwartete Ergebnis P_{12} , dass die Kugel durch eines der beiden Löcher gegangen ist und am Ende an Position x an der Auffangwand auftrifft. Wenn man eines der Löcher verschließt, können die Kugeln nur noch durch das andere Loch in der Platte gehen, daher ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 gemäß Abbildung 4. Wenn man die Ergebnisse der Messungen mit jeweils einem verschlossenen Loch in Abbildung 4 mit dem Ergebnis "beide Löcher offen" aus Abbildung 3 vergleicht, stellt man fest, dass sich die Wahrscheinlichkeiten $P_{12} = P_1 + P_2$ einfach addieren.

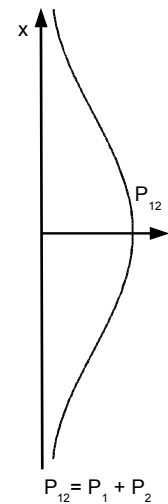


Abbildung 3

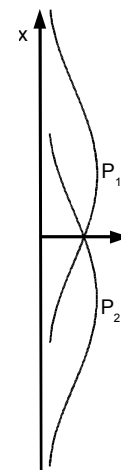


Abbildung 4

Was passiert beim Doppelspaltexperiment mit Wellen?

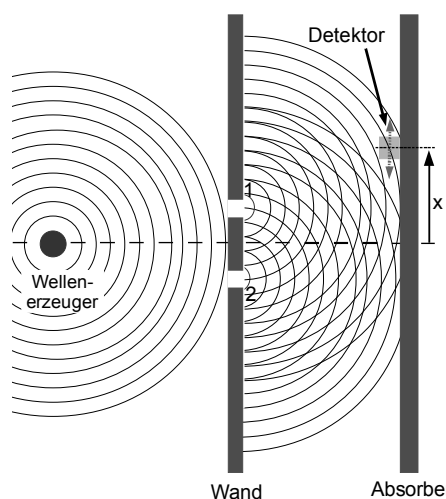
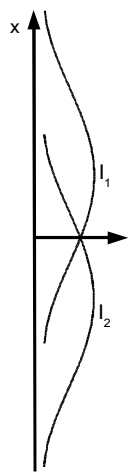


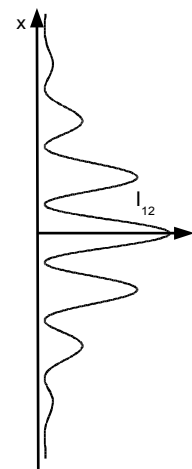
Abbildung 5: Experiment mit Wellen

In einer flachen Wanne mit Wasser wird ein kleiner Stempel auf- und abwärts bewegt, wodurch im Wasser kreisförmige Wellen ($h =$ Höhe des Wasserstands) erzeugt werden. Dahinter setzt man, wie Abbildung 5 zeigt, eine Wand mit zwei Spalten und beobachtet mit einem, in x -Richtung verschiebbaren Detektor, die Intensität ankommender Wellen. Es zeigt sich, dass die Intensität jeden beliebigen Wert annehmen kann, sie ist also nicht auf einen zusammenhängenden festen Wert beschränkt, wie bei massiven Kugeln.



$I_1 = |h_1|^2$, $I_2 = |h_2|^2$
Abbildung 6

Nach Messung der Wellenintensität für verschiedene x -Werte bei gleichmäßig arbeitendem Wellenerzeuger und jeweils einem abgedeckten Spalt, erhält für die Intensitätsverteilung am Absorber die in Abbildung 6 dargestellten Kurven I_1 und I_2 . Mit beiden geöffneten Spalten erhält man die in Abbildung 7 dargestellte Intensitätsverteilung I_{12} , die offensichtlich nicht mit der Summe von I_1 und I_2 übereinstimmt.



$I_{12} = |h_1 + h_2|^2$
Abbildung 7

Die Entstehung dieses Interferenzmusters kann durch Beugung der ursprünglichen Welle an den Spalten, die dann wieder Ausgangspunkt neuer kreisförmiger Wellen sind, erklärt werden. Das beobachtete Muster entsteht durch Interferenz zwischen beiden Wellen.

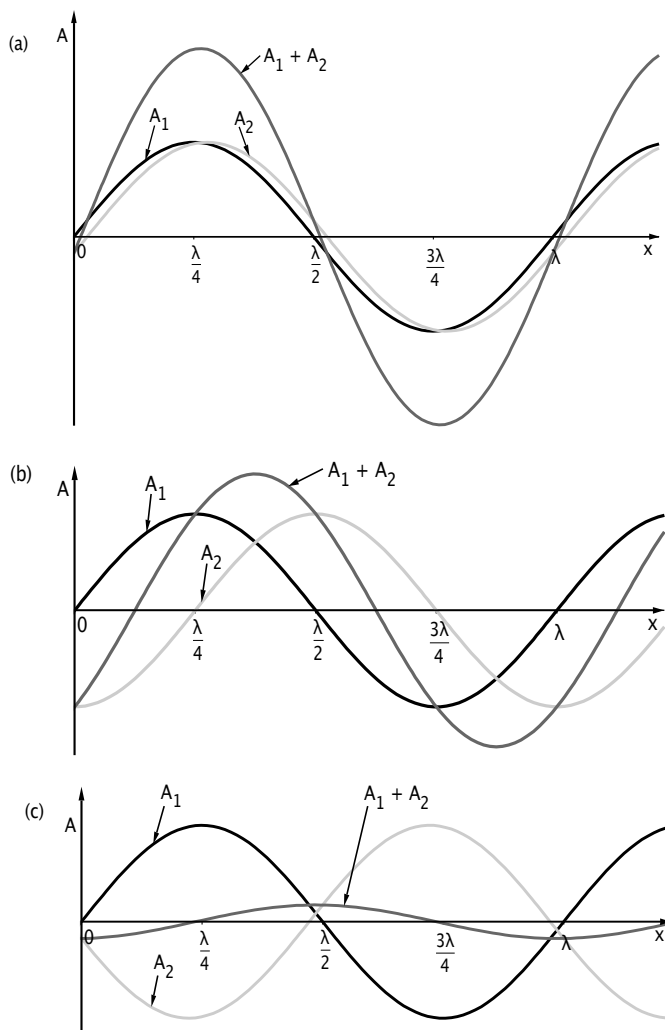
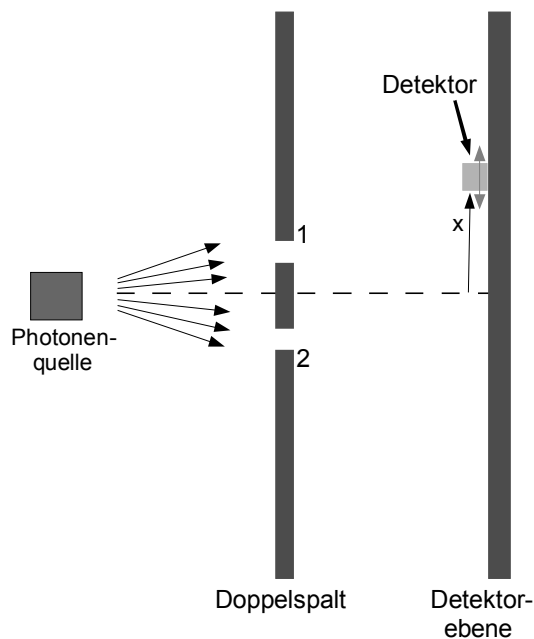


Abbildung 8: Zustandekommen von (a) konstruktiver und (c) destruktiver Interferenz

An den Stellen, an denen die Kurve I_{12} in Abbildung 7 ein Maximum hat, trifft wie in Abbildung 8(a)+(b) dargestellt, Wellenberg auf Wellenberg und es tritt sogenannte *konstruktive Interferenz* auf. Konstruktive Interferenz gibt es immer dort, wo der Abstand vom Detektor zu einem Spalt in etwa um ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge größer oder kleiner ist, als der Abstand vom Detektor zum anderen Spalt. Wenn Wellental auf Wellenberg trifft spricht man von *destruktiver Interferenz*, da sich die Amplituden, wie in Abbildung 8(c) dargestellt, teilweise oder sogar vollständig auslöschten. Solche niedrigen Werte erwartet man immer dort, wo der Abstand vom Detektor zu Spalt 1 in etwa um ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge größer oder kleiner ist, als der Abstand vom Detektor zu Spalt 2.

Das Interferenzmuster wird in großem Maße bestimmt durch das Verhältnis von Wellenlänge zum Abstand der Streuzentren. Für die Entstehung deutlich erkennbarer Interferenzerscheinungen müssen beide im gleichen Größenordnungsbereich liegen.

Was passiert beim Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen?



Der Aufbau des Experiments mit einer grün gefilterten Glühlampe erlaubt es, die Lichtintensität soweit zu reduzieren, dass nur noch einzelne Photonen die Apparatur durchlaufen.

Diese einzelnen Photonen haben einen festen Wert für Impuls und Energie.

Welche Ergebnisse erwartet man, wenn nur noch einzelne Photonen durch die Apparatur laufen?

Abbildung 9: Experiment mit einzelnen Photonen

② Aufbau des Doppelspaltexperiments

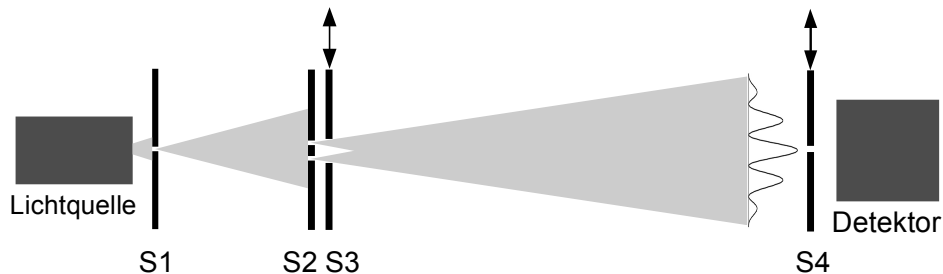


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Doppelspaltexperiments

Lichtquellen

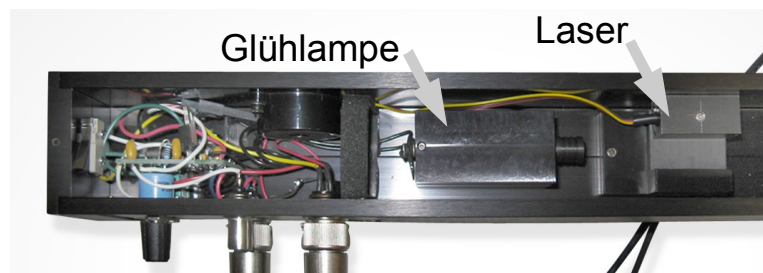


Abbildung 11: Lichtquellen und Bedienelemente bei geöffneter Apparatur

Zur Justierung der Apparatur und für die Messungen im ersten Teil des Experiments (3A) wird ein roter Laser verwendet (siehe Abbildung 11 rechts oben). Wenn alle Messergebnisse von Teil (3A) des Experiments erfasst und gezeichnet wurden, kann für den zweiten Teil des Experiments (3B) vom roten Laser als Quelle auf die wesentlich schwächer leuchtende grün gefilterte Glühlampe umgeschaltet werden (siehe Abbildung 11 Mitte).

Wir verwenden einen roten Laser der Wellenlänge $\lambda = 670 \text{ nm}$ mit einer Leistung von 5mW. Laser können aufgrund ihrer Strahlungseigenschaften und wegen ihrer konzentrierten Leistung biologische Schäden wie z.B. Verbrennungen im Auge verursachen. Weil das Auge für Wellenlängen von ca. 350–1200 nm transparent ist, wird der parallele Laserstrahl durch die Augenlinse auf der Netzhaut fokussiert. Deshalb können schon bei geringen Leistungen von wenigen Milliwatt im ungeschützten Auge partielle Schäden der Netzhaut auftreten.



Beim Experimentieren ist unbedingt darauf zu achten, dass der Laser nicht aus der magnetischen Halterung entfernt wird und niemals direkt in den Laserstrahl geschaut wird!

Quell- und Doppelspalt

Die in der Apparatur verwendeten Spalte sind ca 2x2cm große Metallplättchen in die schmale Öffnung geschnitten wurden. Spalte und Halterungen sind mit einer magnetischen Folie beklebt, was eine einfache Montage und Justage ermöglicht. Um optimale Ergebnisse zu erzielen ist darauf zu achten, dass die Ausrichtung der Spalte immer möglichst senkrecht erfolgt.

Um im eine möglichst punktförmige Quelle zu erhalten, fällt das Licht zuerst auf einen Quellspalt (S1) fallen. Im weiteren Strahlverlauf befindet sich ein Doppelspalt (S2). Wenige Millimeter hinter dem Doppelspalt befindet sich ein horizontal verschiebbarer Ausblendespalt (S3) mit dem sich jeweils einer oder sogar beide Spalte des Doppelspalts verdecken lassen.

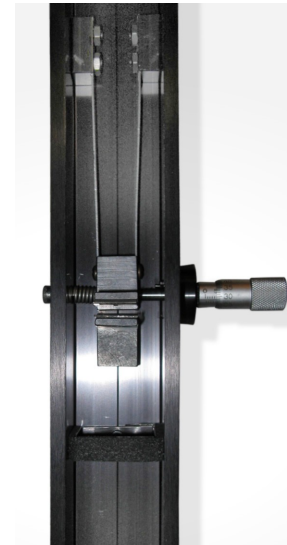


Abbildung 12: Doppelspalt mit Ausblendespalt

Detektorspalt und Shutter



Abbildung 13: Detektorspalt

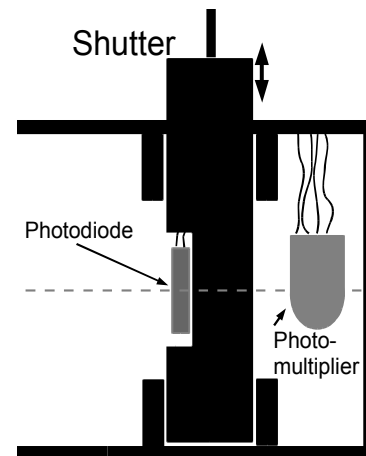


Abbildung 14: Shutter/Detektor

Am rechten Ende der Apparatur befindet sich der Detektor-Spalt (S4), der mit einer Mikrometerschraube definiert in der horizontalen Ebene verschoben werden kann, so dass immer nur ein kleiner Anteil des sich an Position "S4" ergebenden Bildes auf den Detektor weitergeleitet wird (siehe Abbildung 13).

Am rechten Ende der Apparatur befinden sich kurz hinter dem Detektorspalt (S4) Shutter und Detektor (siehe Abbildung 14). Bei geschlossenem Shutter fällt das Messlicht unserer Licht-

quelle auf die Photodiode. Bei geöffnetem Shutter fällt das Messlicht unserer Lichtquelle auf den Photomultiplier.

Photodiode (Photoelement, Solarzelle)

Photodioden sind Halbleiter-Dioden, die einfallendes Licht in einen elektrischen Strom umwandeln. Dieser Photostrom wird in einem Verstärker zu einem Spannungssignal umgewandelt, welches dann linear proportional zum Lichteinfall ist. Das verstärkte Signal der Photodiode liegt an der Buche PHOTODIODE-OUTPUT an.

Photomultiplier (Photoelektronenvervielfachungsröhre)

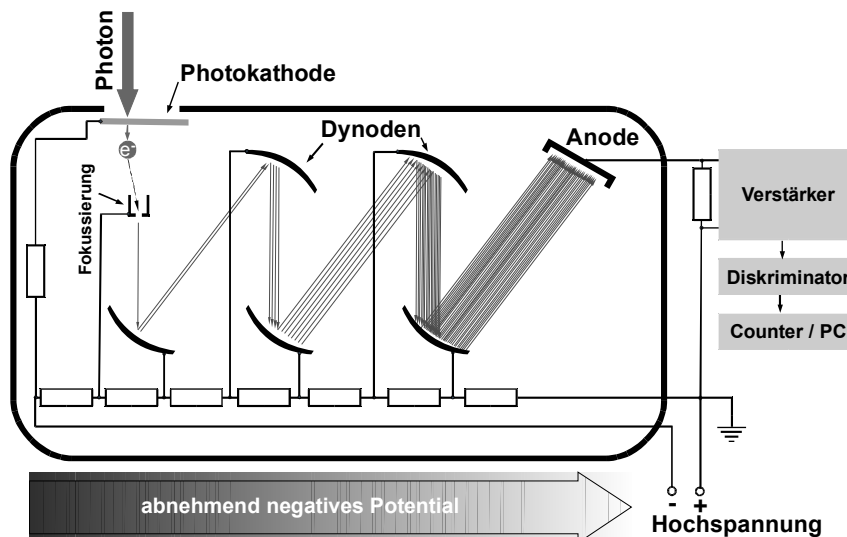


Abbildung 15: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers

Ein Photomultiplier (engl. Photomultiplier Tube PMT) ist eine spezielle Elektronenröhre (siehe Abbildung 15) mit dem Zweck, schwache Lichtsignale (bis hin zu einzelnen Photonen) in ein elektrisches Signal umzuwandeln und dieses zu verstärken.

Wegen ihrer extrem hohen Empfindlichkeit müssen Photomultiplier vor Beleuchtung mit Tageslicht bzw. Raumbeleuchtung geschützt werden, weil sie dabei "erblinden" können.

Für genaue quantitative Messungen, ist jegliches Umgebungslicht abzuschirmen, so dass nur das eigentliche Messlicht auf den Detektor gelangt. Aus diesem Grund müssen unsere Messungen bei geschlossener Messapparatur durchgeführt werden.

Funktionsweise: Beim Auftreffen von Photonen auf die Photokathode, werden durch den photoelektrischen Effekt Elektronen aus der Oberfläche herausgelöst. Durch das anliegenden elektrische Feld werden die freigesetzten Photoelektronen beschleunigt, bis sie auf weitere

Elektroden (sogenannte Dynoden) treffen, aus deren Oberfläche jedes Elektron beim Auftreffen gleich mehrere Sekundärelektronen herausschlägt. Damit die Zahl der Elektronen von Dynode zu Dynode kaskadenartig zunimmt, müssen die Dynoden, wie in Abbildung 15 von links nach rechts gezeigt, auf zunehmend positivem Potential liegen. Dies wird erreicht, indem die anliegende Hochspannung über eine Spannungsteilernetz entsprechend aufgeteilt wird. Am Ende der Photomultiplieröhre treffen die Elektronen auf die Anode und fließen über einen Widerstand zur Masse ab. Der dabei erzeugte Spannungsabfall ist das Ausgangssignal des Photomultipliers, welches am Ausgang PHOTOMULTIPLIER-OUTPUT anliegt.

Diskriminator / Impulse mit dem Lautsprecher hören

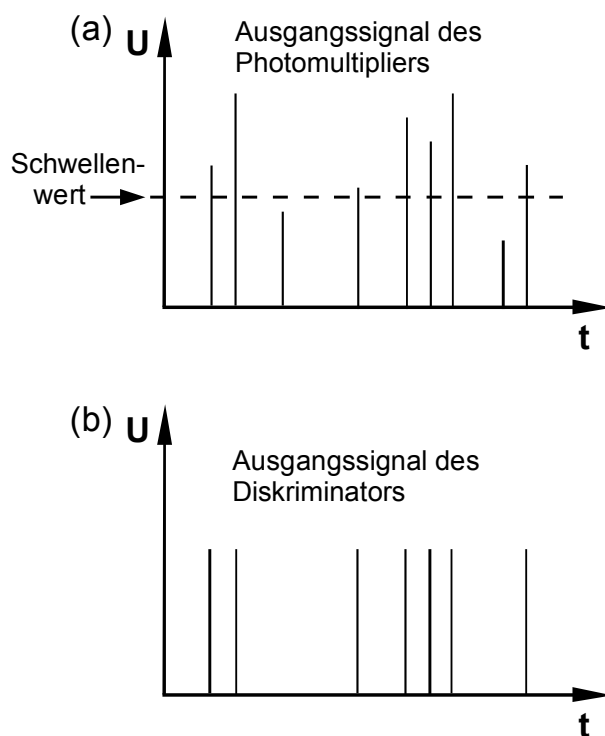


Abbildung 16: Signale am Diskriminator

Der Photomultiplier hat neben dem Ausgang PHOTOMULTIPLIER-OUTPUT, an dem direkt das Ausgangssignal des Photomultipliers anliegt (siehe Abbildung 16a), noch einen weiteren Ausgang DISKRIMINATOR-OUTPUT-TTL der innerhalb der Apparatur über eine Diskriminator-schaltung geleitet wird. Mit einer Diskriminator-schaltung lassen sich bestimmte Signale ausblenden. Wir verwenden hier einen Schwellendiskriminator, der liefert am Ausgang einen Normimpuls (+4V), wenn der Eingangsimpuls ein gewähltes Spannungsniveau (Schwellenwert) überschreitet (siehe Abbildung 16b). Der gewünschte Schwellenwert lässt sich am rechten Bedienfeld mit dem Regler DISCRIMINATOR-LEVEL einstellen.

Dabei ist zu Beachten, dass der Diskriminator nach Angaben des Herstellers nur für Einstellungen des Reglers DISKRIMINATOR-OUTPUT-TTL im Bereich größer als 2 die gewünschte Funktion zeigt.

Der Lautsprecher hat ein separates Netzteil als Stromversorgung. Wenn man den Lautsprecher (siehe Abbildung 17) am rechten Bedienfeld der Apparatur mit dem Ausgang DISKRIMINATOR-OUTPUT-TTL verbindet hört man die Ausgangssignale des Photomultipliers nach der Beeinflussung durch die Diskriminatorschaltung.



Abbildung 17: Lautsprecher

Mikrometerschraube (analoge Messschraube)

Die Spindel der Messschraube hat eine Steigung von 0,50 mm - dies bedeutet, dass sich bei einer Umdrehung der Skalentrommel die Messspindel einen halben Millimeter in Achsrichtung bewegt.



Auf der in Abbildung 18 dargestellten Skalentrommel sind 50 Teilstriche angebracht, jeder Teilstrich

Abbildung 18: Mikrometerschraube

entspricht 10 Mikrometer (μm) also 0,01 mm. Bei einer vollen Umdrehung der Mikrometerschraube bewegt sich die Messspindel also 500 μm in Achsrichtung.

Auf der Skalenhülse sind oberhalb der Bezugslinie Teilstriche für die vollen Millimeter und unterhalb der Bezugslinie die Teilstriche für 0,5-Millimeter angebracht.

Das Labview-Messprogramm

In Teil (3B) des Experiments werden die Messwerte mit Computerunterstützung aufgenommen. Dabei werden virtuelle Instrumente der Firma NATIONAL INSTRUMENTS verwendet, bestehend aus dem in Abbildung 19 gezeigten Computer-Interface und dem in der grafischen Programmiersprache LABVIEW erstellten Messprogramm.



Abbildung 19: Messinterface von NATIONAL INSTRUMENTS

Mit dem LABVIEW-Messprogramm ist es möglich, die Impulse für jede Stellung der Mikrometerschraube des Detektorspalts zu zählen und graphisch darzustellen.

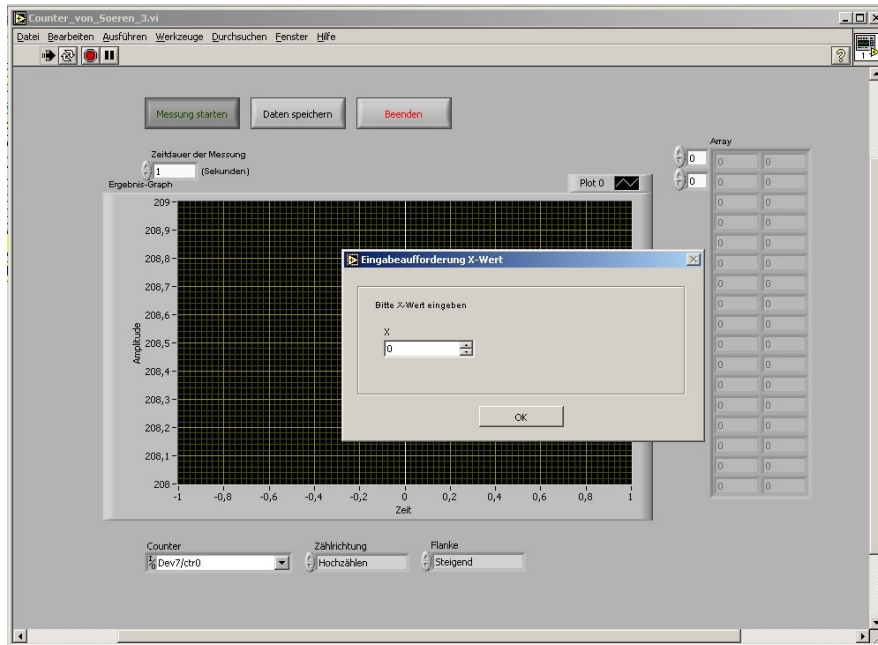


Abbildung 20: Benutzeroberfläche des LABVIEW-Messprogramms

Zum Messen mit Computerunterstützung, wie in Abbildung 19 gezeigt, den Ausgang DISCRIMINATOR-OUTPUT-TTL mit den Klemmen "CTR-0-SOURCE" und "0-GND" des Computer-Interface verbinden und das Messprogramm starten. Die Benutzeroberfläche des Messprogramms ist in Abbildung 20 abgebildet. Startparameter sind "Dev7/Ctr0" als COUNTER, "Hochzählen" bei ZÄHLRICHTUNG und "Steigend" bei FLANKE.

Nachfolgend sind die einzelnen Schritte für Messungen mit dem LABVIEW-Messprogramm angegeben:

1. Der Benutzer legt zuerst die ZEITDAUER einer einzelnen Messung in Sekunden fest
2. Messreihe starten durch anklicken der Schaltfläche MESSUNG STARTEN
- 3a. Dialogfenster öffnet sich, Position der Mikrometerschraube (X-WERT) eingeben
- 3b. Impulse für den vorgewählten Zeitraum werden gezählt und graphisch dargestellt
4. Wiederholung der Messungen ab Schritt-(3a), bis die Messreihe vollständig ist
5. Daten Speichern durch anklicken der Schaltfläche DATEN SPEICHERN, Dialog öffnet sich
6. Messreihe beenden durch anklicken der Schaltfläche BEENDEN



Fragen zum Doppelspaltexperiment

Wozu dient der Detektorspalt bei den Messungen?

Was macht die Diskriminatorschaltung?

Wozu dienen die Teilstriche unterhalb der Bezugslinie der Mikrometerschraube?

Wie wird die Energie von Photonen angegeben?

Welche Rolle spielt das Plancksche Wirkungsquantum h ?

Was misst man beim Photomultiplier mit geschlossenem Shutter?

③ A Messungen mit Laser und Photodiode

Vorbereitungen

Zur Vorbereitung der Messungen sicherstellen, dass der Shutter des Photomultipliers geschlossen ist und so die auf dem Shutter angebrachte Photodiode beleuchtet wird. Nur bei geschlossenem Shutter kann der Deckel der Apparatur ohne Beschädigung des Photomultipliers geöffnet werden, denn wegen der extremen Verstärkungswirkung des Photomultipliers führt sonst das Streulicht der Raumbelichtung zu Beschädigungen bzw. Zerstörung des Photomultipliers.

Jetzt die Spalte, wie in Abbildung 10 gezeigt, in die Apparatur einsetzen. Spalte und Halterungen sind mit magnetischer Folie beklebt um ein einfaches Justieren zu ermöglichen.

Den Laser einschalten und so justieren, dass der Strahl genau auf den Quellspalt (S1) fällt. Das Bild dieses Einzelspalts lässt sich mit den vorhandenen Pappkarten weiter in Richtung Detektor verfolgen. Den Strahl so justieren, dass beide Spalte des Doppelspalts (S2) gleichmäßig beleuchtet werden. Zur Kontrolle sollten auf einer direkt hinter dem Doppelspalt (S2) gehaltenen Pappkarte zwei helle rote Linien gleicher Intensität erkennbar sein.

Den Ausblendespalt (S3) mit der Mikrometerschraube so justieren, dass die Positionen "beide Spalte verdeckt", "beide Spalte offen", "ein Spalt offen" und "anderer Spalt offen" auch später bei geschlossener Apparatur wieder zuverlässig eingestellt werden können. Zur Kontrolle mit einem Stück Papier direkt hinter dem Ausblendespalt überprüfen.

Nun kann es losgehen mit den Messungen!

Das Kabel der Photodiode, das aus dem Shutter herausragt, mit der Buchse PHOTODIODE-INPUT des Messverstärkers verbinden und das Digital-Multimeter an die Buchse PHOTODIODE-OUTPUT des Messverstärkers anschliessen, so dass positive Spannungswerte angezeigt werden.

Führen Sie mit dem Detektorspalt nacheinander vier Horizontal-Scans des Interferenzbildes in der Detektorspaltebene (S4) durch und messen die jeweilige Photodioden-Spannung für folgende Positionen des Ausblendespalts. Bitte nehmen Sie für die Positionen (b), (c), (d) jeweils ca. 80 Messpunkte auf (für Position (a) nur ca 10-15 Messpunkte aufnehmen!).

- (a) beide Spalte verdeckt
- (b) vorderer Spalt verdeckt, hinterer Spalt offen
- (c) vorderer Spalt offen, hinterer Spalt verdeckt
- (d) beide Spalte offen

Bitte die Mikrometerschraube bei den Messungen nicht über den Punkt "8,00 mm" hinaus drehen, da die Halterung des Detektorspalts dann nicht mehr die ganze Photodiode verdeckt und Streulicht auf die Photodiode fällt welches die Messwerte in diesem Bereich verfälscht.

Frage: Wie deuten Sie die Messkurve für Position-(a), bei der beide Spalte verdeckt sind?

Bitte stellen Sie die Abhängigkeit der Photospannung von der Detektorspaltposition für die verschiedenen Spaltkombinationen (b), (c), (d) in einem Diagramm auf Millimeterpapier dar und beschreiben ihre Beobachtungen.

③ B Messungen mit Glühlampe und Photomultiplier



Vorbereitungen



Abbildung 21: Linkes Bedienfeld



Abbildung 22: Rechtes Bedienfeld

Stellen sie zunächst sicher, dass der Shutter geschlossen ist, bevor sie den Deckel der Apparatur abnehmen. Die Glühlampe bitte nur schalten, wenn der Spannungsregler (BULB POWER), wie in Abbildung 21 gezeigt, in Position "0" steht. Den Wahlschalter auf Glühlampe (BULB) als Lichtquelle umschalten. Den Laser zur Seite schieben und die Glühlampe so justieren, dass der Quellspalt gleichmäßig beleuchtet wird. Den Deckel der Apparatur wieder aufsetzen und verriegeln. Der Regler für die Hochspannung des Photomultipliers (HIGH VOLTAGE) ist ein 10-gängiges Potentiometer. Bitte stellen Sie sicher, dass dieser beim Ein- und Auschalten der Hochspannung immer gegen den Uhrzeigersinn bis zum Anschlag auf "0" eingestellt ist (siehe Abbildung 22).

Verbinden Sie den Ausgang des Diskriminators (DISKRIMINATOR OUTPUT TTL) mit der Interface-Karte des PC's und dem Lautsprecher. Nun die Hochspannung einschalten und den Spannungsregler in halben Umdrehungen immer weiter höher drehen, bis am angeschlossenen Lautsprecher Knackgeräusche zu hören sind.

Frage: Wie interpretieren sie die gemessenen Impulse bei geschlossenem Shutter?

Öffnen Sie nun den Shutter, erhöhen langsam den Strom durch die Glühlampe und bewegen dabei den Detektorspalt in eine Position mit maximaler Impulszahl. Stellen sie den Lampenstrom so ein, dass ungefähr 1000 Impulse/s erreicht werden. Stellen Sie nun den Ausblende-spalt so ein, dass beide Spalte verdeckt werden und messen Sie 10-15 mal die Zahl der Impulse für eine feste Position.

Frage: Wie deuten Sie das Ergebnis der Messung in der Position "beide Spalte verdeckt"?

Führen Sie wieder drei Horizontal-Scans in der Detektorspaltebene (S4) durch. Geben sie im LABVIEW-Messprogramm jeweils die Position des Detektorspalts ein (ca. 80 Messpunkte) und bestimmen die Impulszahl für eine feste Messzeit für folgende Positionen des Ausblende-spalts:

- (a) vorder Spalt offen, hinterer Spalt verdeckt
- (b) vorderer Spalt verdeckt, hinterer Spalt offen
- (c) beide Spalte offen

Bitte stellen Sie die Abhängigkeit der Impulszahl von der Detektorspaltposition für die verschiedenen Spaltkombinationen (a), (b), (c) in einem Diagramm dar.



1. Wie deuten Sie die Messkurven aus Teil (3B) des Experiments?
2. Was interferiert?
3. Wie können Interferenzerscheinungen bei Teilchenexperimenten beschrieben werden?
4. Welche Ansätze im Zusammenspiel von Welle und Teilchen können Sie herausfinden?

Bitte diskutieren Sie mit Ihrer Gruppe Ihre Beobachtungen, Vermutungen, Erklärungen und schreiben die Ergebnisse kurz auf, damit Sie diese in der Abschlussdiskussion mit dem Betreuer einbringen können!

Anhang A2 - Nachbereitung zum Doppelspaltexperiment

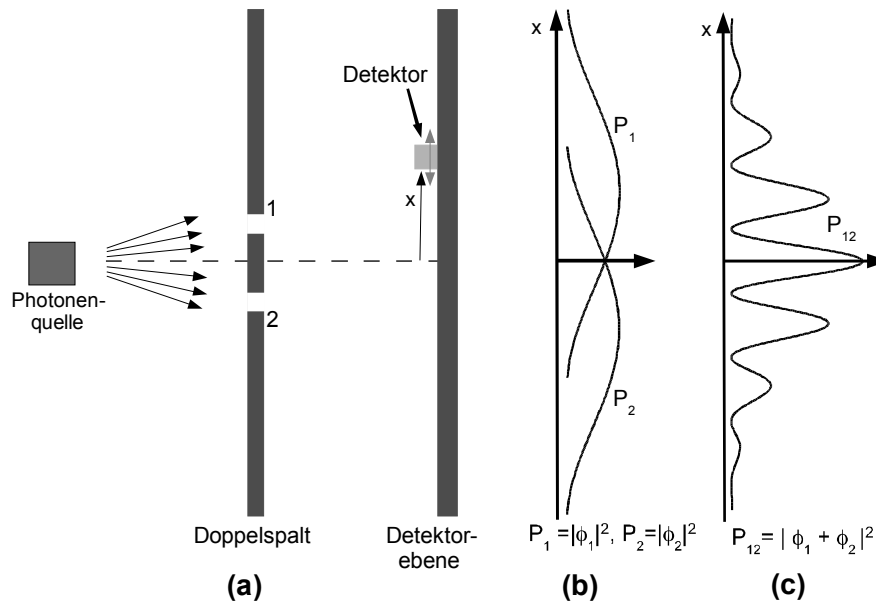
④ Nachbereitung zum Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen

Abbildung 23: Experiment mit einzelnen Photonen

Auf der linken Seite befindet sich eine Glühlampe, deren Lampenstrom so niedrig eingestellt wird, dass nur einzelne Photonen die Apparatur durchlaufen. Rechts von der Quelle befindet sich der Doppelspalt und etwas weiter rechts der in x -Richtung verschiebbare Detektorspalt mit dahinterliegendem Photomultiplier, der mit einem Lautsprecher verbunden ist, um die gemessenen Signale hörbar zu machen.

Bei Durchführung des Experiments stellt man fest, dass die Knackgeräusche im Lautsprecher sehr unregelmäßig zu hören sind, aber bei Messungen über einen ausreichend langen Zeitraum die durchschnittliche Rate ziemlich gleich ist. Wenn man den Detektor in x -Richtung verschiebt, erhöht bzw. reduziert sich die Rate, mit der die Knackgeräusche zu hören sind. Reduzieren des Lampenstroms der Glühlampe verringert die Klickrate, und wenn man zwei Detektoren hintereinander plazieren würde, würde immer nur einer der beiden ansprechen. Daraus schließt man, dass alles, was den Detektor erreicht, dort als ganzes zusammenhängendes Objekt mit einem festen Wert ankommt. Analog zum Experiment mit massiven Kugeln ergibt sich die relative Wahrscheinlichkeit, dass solche Objekte an der Auffangwand im Abstand x von der Mitte ankommen, durch Registrierung der "Knack"-Rate an einer Position x bei konstantem Teilchenausstoß der Quelle.

Um die Kurve P_{12} in Abbildung 23 (c) und das Verhalten der Photonen zu verstehen nehmen wir zuerst an, dass die Photonen entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2 gehen. Wenn diese Behauptung zutrifft, kann man alle an der Auffangwand eintreffenden Elektronen in zwei Gruppen einteilen: die durch Spalt 1 gehen und die durch Spalt 2 gehen. Daher müsste die Kurve P_{12} in Abbildung 23(c) die wir registrieren die Summe der Effekte der Elektronen durch Spalt 1 und Spalt 2 sein.

Messungen mit jeweils einem geschlossenen Spalt ergeben die in Abbildung 23(b) dargestellten Kurven P_1 und P_2 . Die Kurve P_{12} , die man erhält, wenn beide Spalte offen sind, ist offensichtlich nicht die Summe der Wahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 der beiden Einzelspalte. Analog zum Experiment mit Wasserwellen stellen wir fest, dass Interferenz auftritt und $P_{12} \neq P_1 + P_2$ gilt.

Nun stellt sich die Frage, wie eine solche Interferenz entstehen kann? Vielleicht ist die Aussage, dass die Photonen entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2 gehen, in Frage zu stellen? Es gibt aber einige Stellen in der Detektorebene, an denen, wie in Abbildung 23(c) zu sehen ist, sehr wenige Photonen ankommen, wenn beide Spalte geöffnet sind, aber, wie in Abbildung 23(b) zu sehen ist, viele Photonen empfangen, wenn einer der Spalte geschlossen wird. Außerdem ist der zentrale Wert (in der Mitte), der aufgenommenen Kurve P_{12} mehr als doppelt so groß, als die Einzelwahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 .

Analog zu den Wellen erhält man eine einfache Beschreibung, indem man die Ankunfts-wahrscheinlichkeiten der Photonen in der Detektorebene durch zwei komplexe Zahlen ϕ_1 und ϕ_2 angibt. Das Absolutquadrat von ϕ_1 ergibt die Effekte, wenn nur Spalt 1 offen ist ($|\phi_1|^2 = P_1$), analog ergibt sich $|\phi_2|^2 = P_2$, wenn nur Spalt 2 geöffnet ist. Im Fall, dass beide Spalte offen sind, ergibt sich analog zu Wellen ebenfalls die Ankunfts-wahrscheinlichkeit $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$.

Dies bedeutet, dass die Elektronen wie Teilchen immer als ganzes zusammenhängendes Objekt mit einem festen Wert ankommen, und die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dieser Objekte verteilt ist, wie die Intensität einer Welle. So läßt sich verstehen, wieso sich ein Photon manchmal wie ein Teilchen und manchmal wie eine Welle verhält.

Die Situation ändert sich jedoch schlagartig, wenn man beobachten kann, durch welchen Spalt die Photonen hindurchtreten.

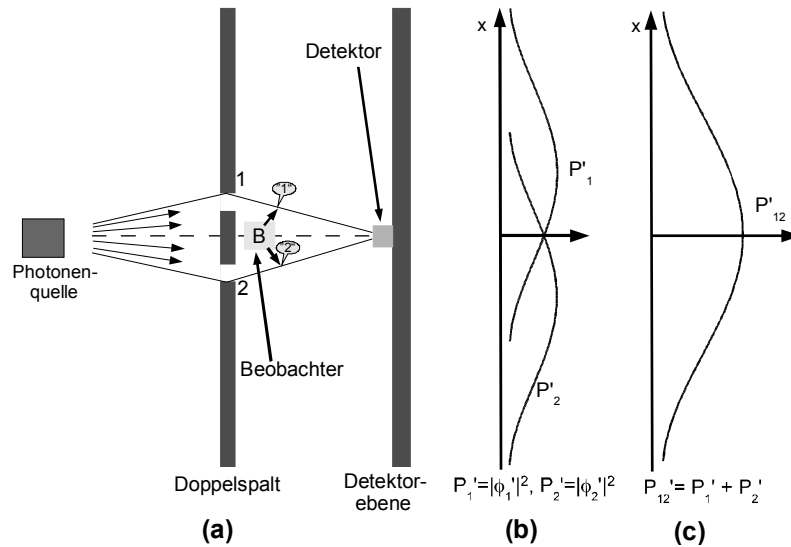


Abbildung 24: Doppelspaltexperiment mit beobachteten Photonen

Plaziert man, wie in Abbildung 24(a) gezeigt, hinter dem Doppelspalt an der Position (B) eine Vorrichtung mit der man zuordnen kann, durch welchen der beiden Spalte das Photon hindurchgetreten ist.

Mit dieser Experimentieranordnung registriert man durch welchen Spalt das Photon hindurchgetreten ist und erhält, ganz ähnlich zu den Messwerten P_1 und P_2 in Abbildung 23(b) mit unbeobachteten Photonen, die in Abbildung 24(b) dargestellten Kurven für die Ankunftsverwahrscheinlichkeiten P'_1 und P'_2 . Das Ergebnis für die Gesamtwahrscheinlichkeit könnte man nun einfach dadurch erhalten, dass man annimmt, man habe nie zuordnen können, durch welchen Spalt das Photon hindurchgetreten ist und dementsprechend die Zahlen für Spalt 1 und Spalt 2 einfach addieren. Hierbei ergibt sich jedoch nicht die schon bekannte Interferenzkurve P_{12} für unbeobachtete Photonen aus Abbildung 23(c), sondern die in Abbildung 24(c) dargestellte neue Kurve, P'_{12} die keine Interferenz zeigt.

Dies zeigt, dass auch der Messprozess Auswirkung auf das Ergebnis hat. Aus der Tatsache, dass die Verteilung der Elektronen an der Auffangwand für "beobachtete" Elektronen anders ist, als für "unbeobachtete" Elektronen schließt man, dass der Messprozess des Beobachtens das Zustandekommen von Interferenzerscheinungen verhindert. Erst wenn man die Wellen-

länge der Lichtquelle des Beobachters soweit erhöht dass sie größer als der Abstand der beiden Löcher ist, ist wieder Interferenz zu beobachten. Dabei kann jedoch nicht mehr auf den genauen Wegverlauf des Elektrons geschlossen werden, da der beobachtete Lichtblitz keine Ortsauflösung zwischen Loch 1 oder Loch 2 mehr erlaubt. Dieses Prinzip hat Heisenberg als Unbestimmtheitsprinzip in die Quantenphysik eingeführt und für das hier dargestellte Experiment würde es folgendermaßen lauten: *Es ist unmöglich einen Apparat zu entwickeln, der feststellt, durch welches Loch das Elektron hindurchtritt, ohne dass der Apparat gleichzeitig die Elektronen soweit stört, dass das Interferenzbild zerstört wird.* Bisher hat niemand einen Weg gefunden, der um das Unbestimmtheitsprinzip herumführt. Daher muss davon ausgegangen werden, dass das Unbestimmtheitsprinzip eine grundsätzliche Eigenschaft der Natur beschreibt.

Im Experiment mit Kugeln in sind die Wellenlängen für massive Kugeln so klein, dass die Interferenzlinien sehr fein werden. Ein physikalischer Detektor überdeckt die Schwankungen der Wahrscheinlichkeitskurve, so dass eine mit der klassischen Kurve übereinstimmende quasi gemittelte, glatte Kurve gemessen wird.

Anhang A3 - Protokolle von Probemessungen

Protokolle von Probemessungen

Messungen mit Laser/Photodiode

Spaltabstand: 0,406 mm

Nulleffekt: 0,01V

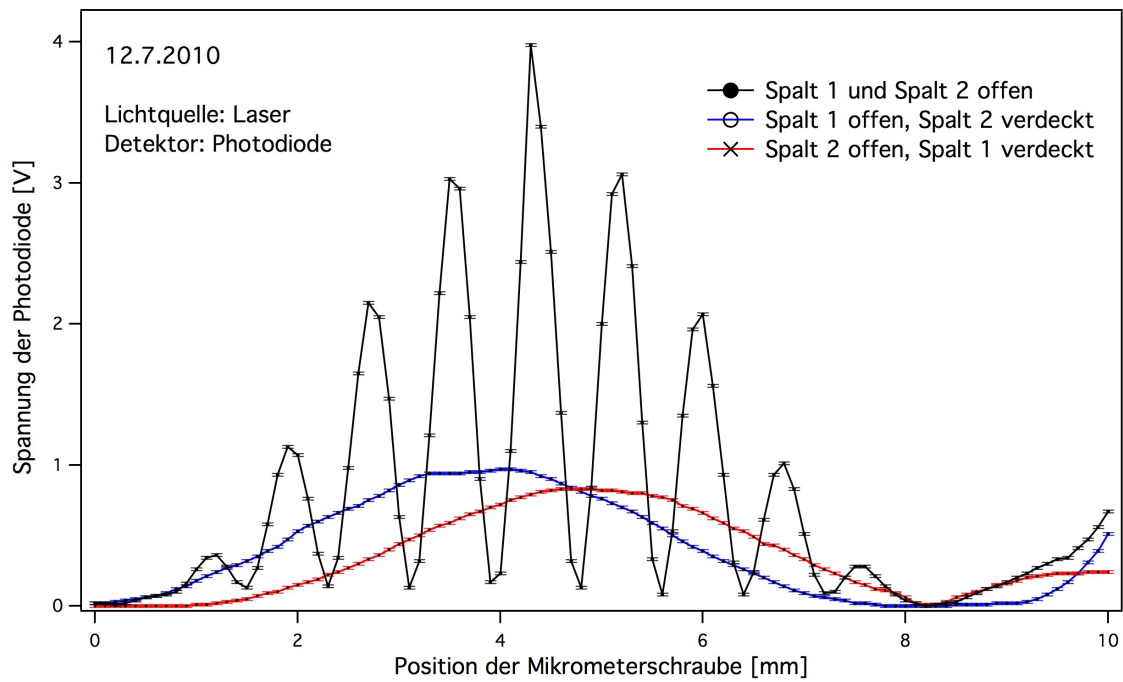


Abbildung 25: Doppelspaltexperiment mit Laserlicht

Messungen mit Glühlampe/Photomultiplier

Spaltabstand: 0,406 mm

Hochspannung: Regler auf 4,5

Regler Lampenstrom: 4

Zeitdauer: 1 Sekunde

Nulleffekt (Impulse/s): 6, 10, 7, 6, 11, 3, 11, 9, 9, 4, 3

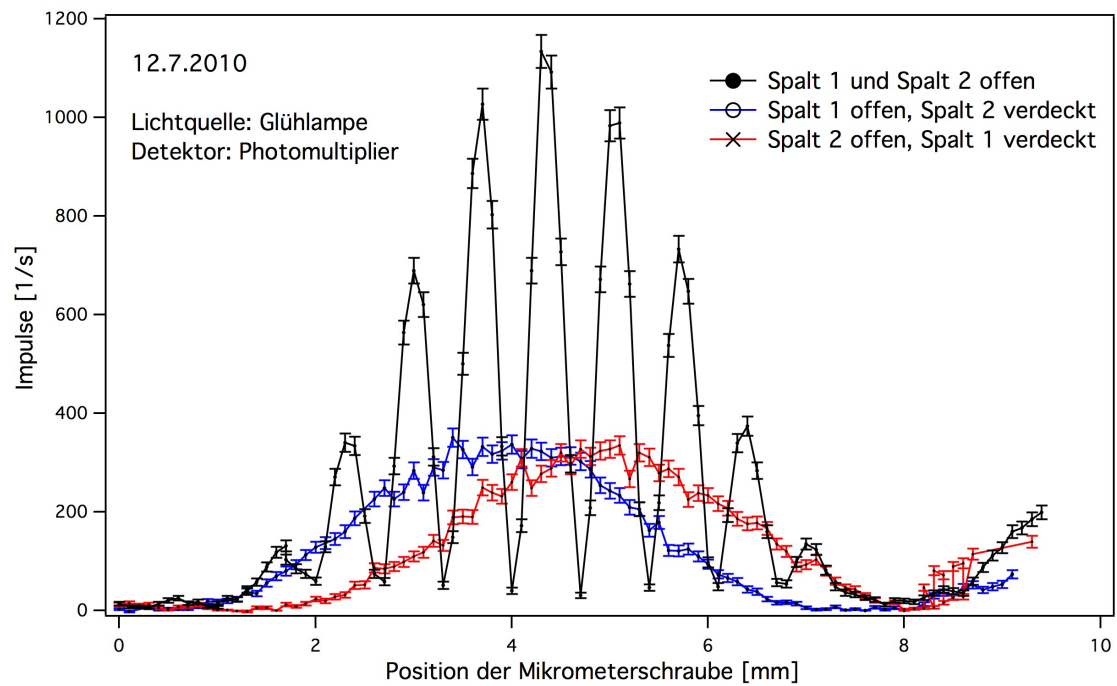


Abbildung 26: Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen

Anhang A4 - Dokumentation des LABVIEW-Programms

Das LABVIEW-Messprogramm wurde von den wissenschaftlichen Mitarbeitern am Institut für Laserphysik der Universität Hamburg erstellt.

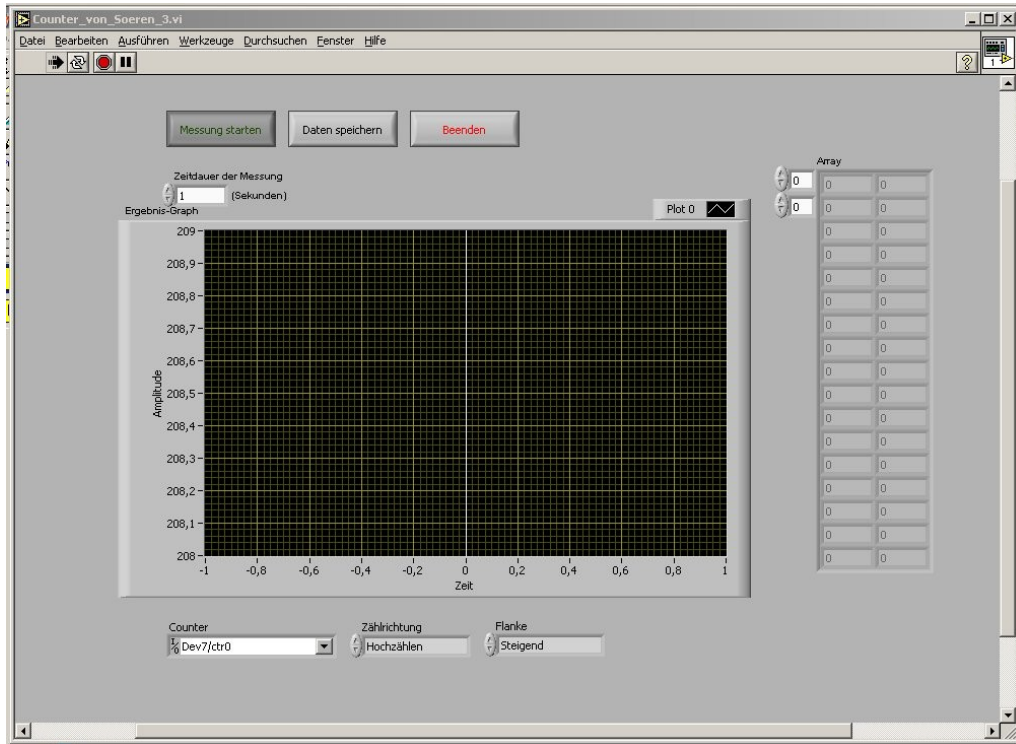


Abbildung 27: Benutzeroberfläche des LABVIEW-Messprogramms

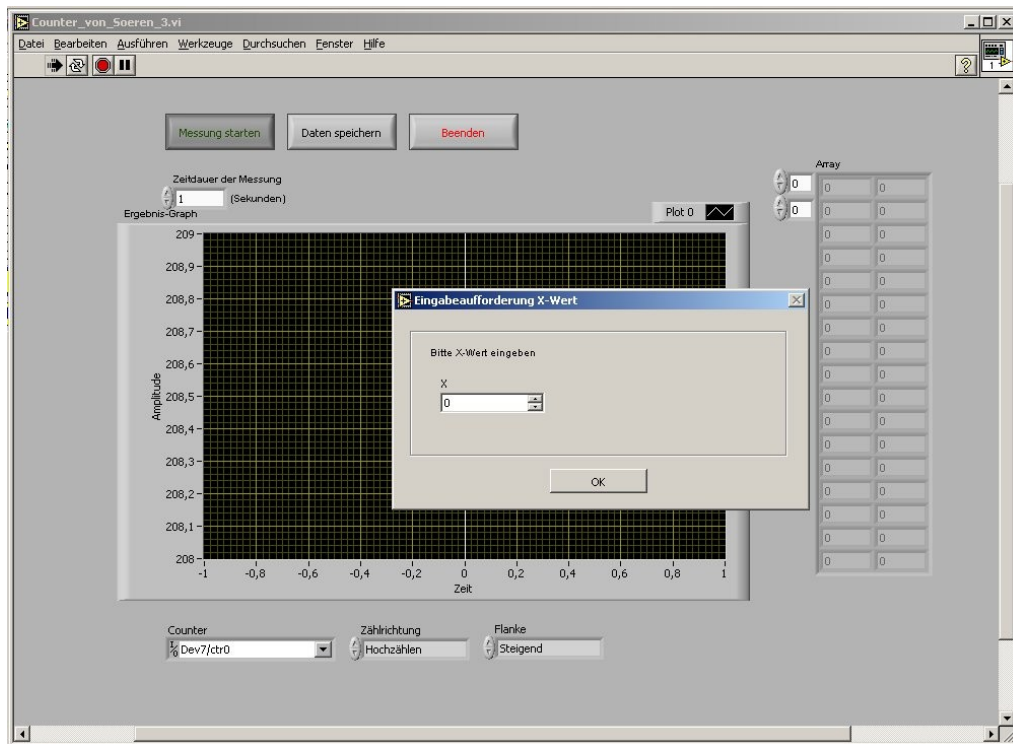


Abbildung 28: LABVIEW-Messprogramm mit Eingabefenster

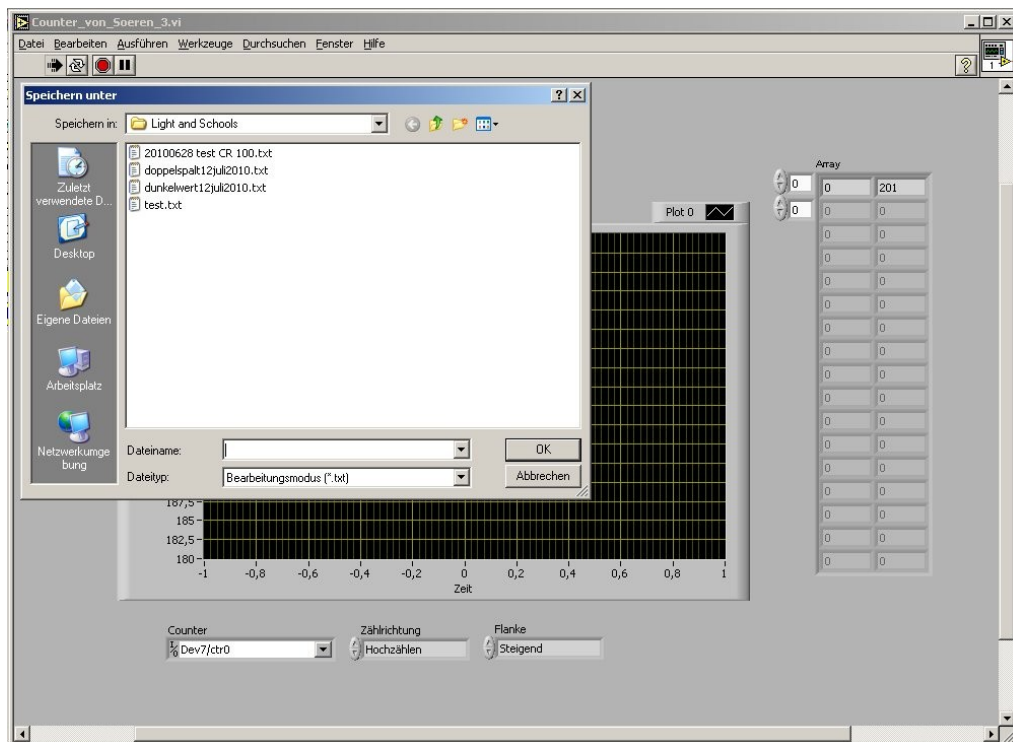


Abbildung 29: LABVIEW-Messprogramm mit Speicher-Dialog

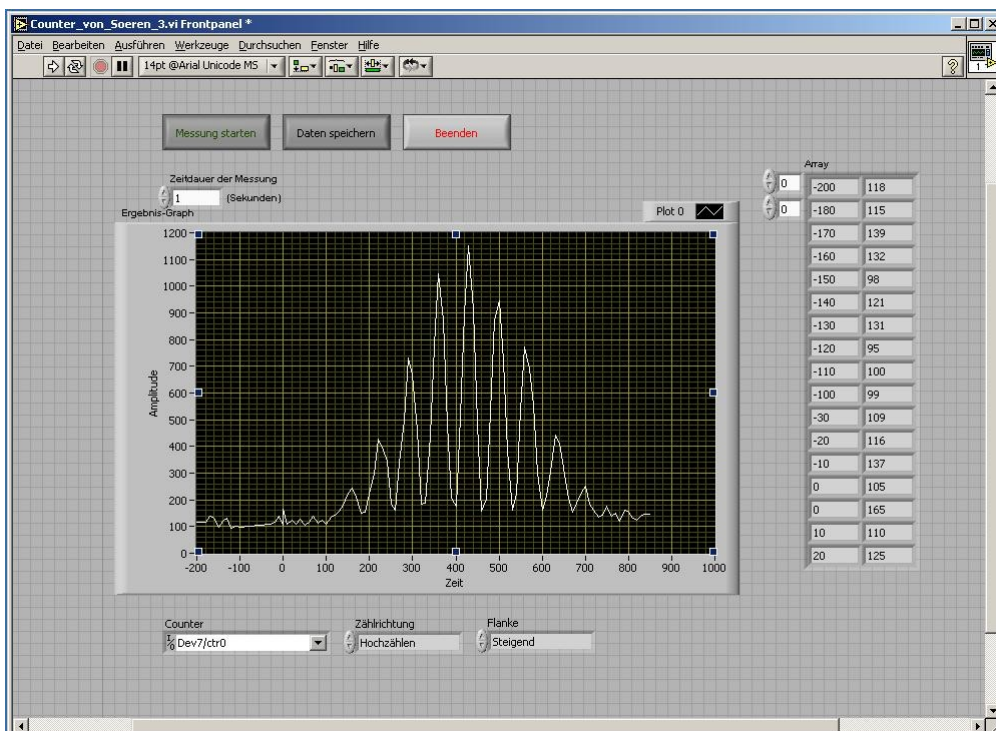


Abbildung 30: LabView-Messprogramm mit Interferenzbild

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe verfasst und mich dabei anderer als der angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe.

Ich bin mit einer späteren Ausleihe der arbeit nicht einverstanden

Hamburg, 20.7.2010