

Der Quantenradierer

Quantentheorie in der Schule

Peter Schmid, Nikolaus Unterrainer

In der Aprilausgabe 2007 der Zeitschrift Scientific American [1] wurde unter dem etwas plakativen Titel „A Do-It-Yourself Quantum Eraser“ ein einfacher Versuch vorgestellt, wie in einem Doppelspaltversuch mit polarisiertem Laserlicht Quanteneigenschaften demonstriert werden können.

Nach längerer Beschäftigung mit diesem Versuch kamen wir zur Überzeugung, dass er eine ausgezeichnete Einführung in die Problematik der Quantenphysik auf Sekundarstufenniveau bietet.

Quantenphysik ist die grundlegende Theorie für den Aufbau der Materie und deren chemischen Eigenschaften. Einige Quantenphänomene sind heute Teil der Alltagsphysik (Laser, Supraleitung), andere versprechen neue Anwendungen (Quantenkryptografie, Quantencomputing). Quantenphysik wurde daher zu einem verpflichtenden Teil des Physikcurriculums der Sekundarstufe. Nun ist es für die meisten Bereiche der modernen Physik und besonders für die Quantenphysik schwierig, die theoretischen Aussagen mit Experimenten zu veranschaulichen, die mit Schulmitteln durchgeführt werden können. Gerade der Quantenradierer ist jedoch mit einfachen Mitteln und mit aktiver Beteiligung der Schüler aufzubauen und führt unmittelbar in die Grundproblematik der Quantenmechanik ein.

In der klassischen Physik spielt die Unterscheidung zwischen Teilchen und Wellen eine fundamentale Rolle. Beugungs- und Interferenzerscheinungen „bewiesen“ die Wellennatur des Lichtes, die durch die Maxwell-Gleichungen als elektromagnetisches Phänomen ihre „endgültige“ Erklärung fand. Materielle Objekte sollten sich hingegen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik bewegen, in der Interferenzerscheinungen ausgeschlossen sind. Der Unterschied zwischen Teilchen- und Welleneigenschaften kann im Verhalten von Objekten beim Durchgang eines Strahls durch eine Lochblende oder einen Spalt demonstriert werden. Noch eindrucksvoller ist das Verhalten der Objekte beim Doppelspaltversuch. Während klassische Teilchen die beiden Spalte am Beobachtungsschirm getreu abbilden, erzeugt Licht für jeden Spalt ein Beugungsbild. Das Beugungsbild des Doppelspaltversuches unterscheidet sich aber noch einmal ganz wesentlich von der Summe der Beugungsbilder der Einzelspalte.

Dr. Peter Schmid, Experimentalphysiker, war am CERN in leitender Stellung tätig. E-Mail: Uandpschmid@aon.at

Mag. Klaus Unterrainer unterrichtet am BG Salzburg/Zaunergasse und ist Lehrbeauftragter für Physikdidaktik an der School of Education/Universität Salzburg. E-Mail: nikolausunterrichter@yahoo.de

Eine grundlegende Erkenntnis der Quantenphysik ist die Aufhebung des klassischen Gegensatzes von Teilchen- und Wellenverhalten für Mikroobjekte. An Stelle des Gegensatzes tritt die „Dualität“, d.h., dass sich Mikroobjekte je nach experimentellem Aufbau eher wie Teilchen oder wie Wellen verhalten.

Der Quantenradierer ermöglicht eine Veranschaulichung der Teilchen-Welle Dualität und damit des Konzeptes eines „Quantenobjektes“. Er zeigt auch die Abhängigkeit der Messergebnisse vom konkreten Versuchsaufbau. Die Verwendung polarisierten Laserlichts und verschiedene Anordnungen von Polarisationsfiltern zwischen Lichtquelle, Doppelspalt und Beobachtungsschirm bilden den „Versuchsraum“.

Polarisation und ihre Deutung als elektromagnetische Eigenschaft

Der Aufbau der Versuche und die Logik der Interpretation sind in der Literatur ausführlich dargestellt [2]. Eine bei der Fortbildungswoche 2015 verwendete Powerpoint-Präsentation ist auf der Website von Plus Lucis zu finden [3]. In diesem Artikel sollen daher die drei Stufen des Versuchsaufbaus nur schematisch dargestellt werden, um die Ergebnisse und ihre Bedeutung im Rahmen der Quantenphysik besprechen zu können.

Versuch 1: Streuung des polarisierten Laserlichtes an einem Draht.

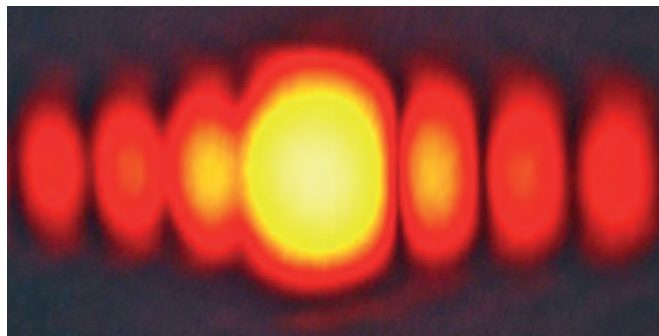


Abb. 1: Beugung am Draht

Bei geeigneten Durchmesser des Laserstrahls und des Drahtes entspricht dieser Aufbau einem „Doppelspaltversuch des armen Mannes“: Die beiden durch den Draht nicht blockierten (Zylinder-)Segmente des Strahls interferieren hinter dem Draht genau so, wie Licht einer ausgedehnten

ebenen Welle an einem Doppelspalt. Die besondere Segmentform in der Drahrichtung ist für die Beugung normal dazu irrelevant. Das Beugungsmuster ist von der Ausrichtung der Polarisation des Laserstrahls relativ zur Richtung des Drahtes unabhängig.

Versuch 2: Anbringen von Polarisationsfiltern an beiden Seiten des Drahtes (in der Drahtebene).

Versuch 2a: Gleiche Orientierung der Polarisationsfilter auf beiden Seiten des Drahtes.

Ergebnis: Das Beugungsmuster am Schirm ist gleich wie in Versuch 1, die Intensität hängt jedoch vom Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des Strahls und jener der Filter ab: maximale Intensität bei paralleler Ausrichtung, völlige Auslöschung bei aufeinander senkrechter Ausrichtung.

Das Licht hinter der Drahtebene ist in Richtung der Filter polarisiert, unabhängig von der Polarisationssebene des ursprünglichen Laserlichtes. Dies sollte mit einem weiteren Polarisationsfilter hinter der Drahtebene nachgeprüft werden. Die Eigenschaft des Lichtes wird also durch die Versuchsanordnung verändert. Es ist wichtig, an dieser Stelle das Versuchsergebnis hinsichtlich der Polarisation des durchgelassenen Lichtes durch Vektorprojektion (in der Ebene) zu erklären. Diese Vektorprojektionen sind für die Erklärung der weiteren Versuche wesentlich.

Versuch 2b: Orientierung der Polarisationsfilter in der Drahtebene in aufeinander normalen Richtungen. Orientierung der Laserpolarisation in 45° zu diesen beiden Richtungen („diagonal“).

Ergebnis: Das Beugungsmuster am Schirm verschwindet; der Schirm ist gleichmäßig ausgeleuchtet.

Erklärung: Das Licht der an den beiden Seiten des Drahtes durchgelassenen Komponenten hat aufeinander normale stehende Polarisationen. Die Lichtintensität am Schirm ist einfach die Summe der Intensitäten der beiden Komponenten ohne Möglichkeit einer Interferenz.

Versuch 3: Versuchsanordnung wie in Versuch 2b; zusätzliche Polarisationsfilter in einer zweiten Ebene zwischen Draht und Schirm.

Versuch 3a: Hat das zusätzliche Polarisationsfilter die Orientierung der Laserpolarisation („diagonal“), so erscheint wieder das Beugungsmuster des Versuchs 1, natürlich mit abgeschwächter Intensität.

Erklärung: Aus den beiden Lichtanteilen, die rechts und links vom Draht durchgelassen werden und aufeinander normale Polarisation haben, wird jeweils die Komponente in Diagonalrichtung herausgefiltert und so können diese hinter dem zweiten Filter wieder interferieren.

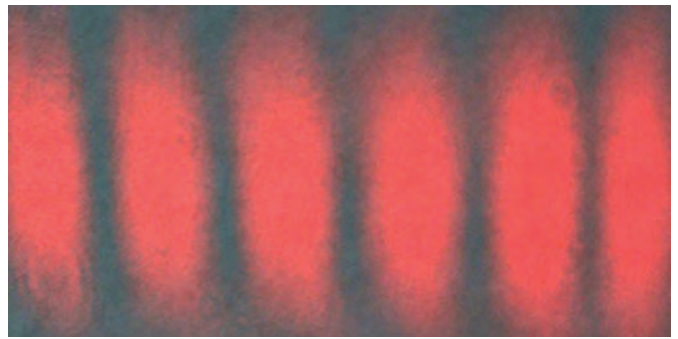


Abb. 2: Quantenradierer mit Diagonalfilter

Versuch 3b: Hat das zusätzliche Polarisationsfilter eine Orientierung normal zur Laserpolarisation („antidiagonal“), so ergibt sich ein Beugungsmuster, dessen Maxima genau auf die Minima des Musters des Versuchs 3a fallen und umgekehrt.

Erklärung: Aus den beiden normal aufeinander polarisierten Lichtanteilen werden die Komponenten in der „Antidiagonalrichtung“ herausgefiltert, die wieder interferieren können, wobei allerdings eine Komponente invers ausgerichtet ist. In diesem Fall ist die Polarisation des Lichtes nach dem zweiten Filter normal zur Polarisation des ursprünglichen Laserlichtes. Der Versuchsaufbau erzeugt einen Zustand des Lichts, der im ursprünglichen Laserlicht nicht vorhanden ist. Die Filter selektionieren also nicht einfach etwas Vorhandenes, sondern sie modifizieren den Zustand.

Durch gleichzeitige Verwendung von entgegengesetzt orientierten Filtern im oberen und unteren Lichtbereich ist es möglich, die beiden versetzten Beugungsmuster der Versuche 3a und 3b gleichzeitig sichtbar zu machen.

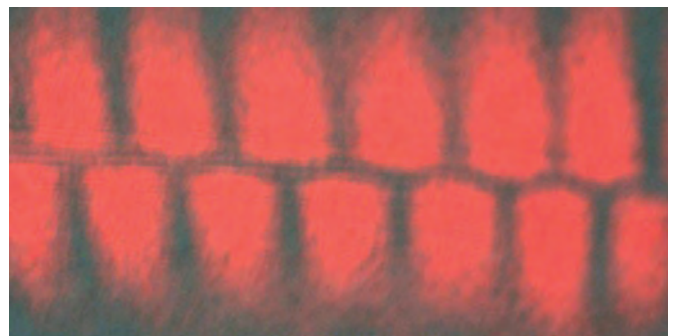


Abb. 3: Quantenradierer mit Diagonal- und Antidiagonalfilter

Deutung der Versuche in der Quantentheorie

Alle Versuche ließen sich durch die Beugungs- und Polarisationseigenschaften des Lichtes als elektromagnetische Welle vollständig erklären. Wie sollten sie etwas über Quantenphysik veranschaulichen können?

Zunächst ist festzustellen, dass materielle Mikroteilchen (Elektronen, Protonen, Neutronen, ...) am Doppelspalt dasselbe Streu- und Interferenzverhalten zeigen wie Licht. Für

Elektronen wurde dies experimentell zum ersten Mal 1961 von C. Jönsson gezeigt [4]. Diese Versuche sind allerdings wegen ihrer apparativen Komplexität an Schulen nicht durchführbar. Wie bereits erwähnt, braucht es den Übergang von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik, um dieses Verhalten beschreiben zu können. Durch „glückliche Umstände“ (siehe den nächsten Abschnitt) lassen sich nun die oben beschriebenen Versuche auch als quantenmechanische Ausbreitung von **Photonen** interpretieren, womit eine „natürliche“ Brücke zwischen klassischer Elektrodynamik und der Quantentheorie hergestellt wird.

In der Interpretation des Laserlichts als Photonenstrahl ist die Streuung am Spalt eine Folge der Heisenbergschen Unschärferelation. Je enger der Spalt, d.h. je genauer der Ort normal zur Spaltrichtung bestimmt wird, umso größer wird die Impulsunschärfe in dieser Richtung (ausgehend von 0 in der einlaufenden ebenen Welle zu den die Nebenmaxima bildenden abgelenkten Photonen). Die Möglichkeit der Interferenz der Beiträge im beschriebenen Experiment ergibt sich aus der kohärenten Überlagerung der Wellenfunktionen der beiden Teilstrahlen. Diese Kohärenz ist allerdings nur dann gegeben, wenn ungemessen bleibt, welchen Weg die einzelnen Photonen gehen.

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Versuche lassen sich nun quantenmechanisch folgendermaßen deuten:

Versuch 1: Beugungsmuster durch quantenmechanische Interferenz der von beiden Spalten auslaufenden Wellenpakete.

Versuch 2a: Keine Veränderung gegenüber Versuch 1, da parallele Polarisationsfilter keine Weginformation liefern.

Versuch 2b: Bei aufeinander normal stehenden Polarisationsrichtungen der beiden Filter in der Drahtebene kann man für jedes Photon mit Hilfe seiner Polarisierung entscheiden, ob es rechts oder links vom Draht vorbei ging. Nach den Regeln der Quantenmechanik zerstört diese Weginformation die Möglichkeit der Interferenz der beiden Wellenpakete.

Versuch 3a und 3b: Zusätzliche Filter mit Polarisationsrichtungen in 45° (diagonal oder antidiagonal) relativ zu den Filtern in der Drahtebene zerstören die durch die Filter in der Drahtebene gewonnene Information vollständig, wodurch die Interferenz wieder möglich wird. (Die Information wird „ausradiert“.)

Das für die quantentheoretische Interpretation der Versuche entscheidende Charakteristikum ist also die Kombination des Beugungsversuchs mit der Möglichkeit der Wegbestimmung durch die Polarisationsfilter. Uns sind keine weiteren Versuche bekannt, in denen die für quantentheoretische Versuche notwendigen Bedingungen in so einfacher Weise realisiert werden können.

Ergänzende Bemerkungen

Die folgenden Bemerkungen sind für eine Durchführung der Versuche in der Schule in keiner Weise notwendig. Sie sind hier angeführt, um die Bedeutung der Versuche in einem weiteren Kontext der Physik zu beleuchten.

Die im vorigen Abschnitt erwähnten „günstigen Umstände“ bestehen darin, dass die Versuchsergebnisse mit zwei völlig verschiedenen Theorien vollständig und präzise beschrieben werden können. Die Möglichkeit gleichwertiger Theorien unter Zugrundelegung ontologisch völlig verschiedener Objekte ist wissenschaftstheoretisch interessant. Es zeigt, dass auch erfolgreiche Theorien keineswegs die Natur der Objekte „endgültig“ festlegen. Die theoretisch eingeführten Objekte bleiben immer zur Beschreibung experimenteller Daten konstruierte Begriffe [5].

Die unterschiedliche Erklärung der Interferenz in den beiden Theorien wurde oben bereits beschrieben. Die für die Weginformation wichtige Polarisierung entspricht in der elektromagnetischen Theorie des Lichtes einer in bestimmter Weise eingeschränkten Schwingungsform des elektrischen Feldvektors. In der Photonentheorie ist Polarisierung ein charakteristischer Zustand der quantenmechanischen Variable „Spin“. Diese für alle Quantenobjekte definierte Variable hat für Photonen den Betrag 1, woraus im Allgemeinen drei mögliche Zustände folgen. Für masselose Photonen reduziert sich die Anzahl möglicher Zustände allerdings auf zwei, in voller Analogie zu den zwei möglichen Komponenten des Polarisationsvektors im 3-dimensionalen Raum der Elektrodynamik.

Die in der Diskussion der Veränderung der Polarisierung in den verschiedenen Stufen der Versuche verwendete Vektorprojektion ist eine nicht nur formal, sondern auch inhaltlich gültige Analogie zu der in der Quantentheorie verwendeten Vektoralgebra im Hilbertraum zur Beschreibung der quantenmechanischen Zustände und der bei Messungen zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten. Dies kann am einfachsten in der Beschreibung möglicher Spinzustände in niedrig-dimensionalen Hilberträumen gezeigt werden.

Selbstverständlich ist die Gleichwertigkeit der Theorien auf den vorgestellten Versuchsaufbau beschränkt. Die Quantentheorie ist die wesentlich allgemeinere Theorie, die in der Form der Quantenelektrodynamik Phänomene beschreibt, die die klassische Elektrodynamik nicht erklären kann (z.B. die Verschränkung in Mehrphotonensystemen). Im konkreten Versuchsaufbau erklärt die Photonentheorie das Auftreten der Beugungs- und Interferenzmuster statistisch auch dann, wenn zeitlich aufgelöst jeweils nur ein Photon die Lichtquelle verlässt und nach dem Durchgang durch die Versuchsanordnung den Schirm trifft. Die Interferenz entsteht also nicht durch eine Wechselwirkung mehrerer Photonen untereinander; jedes einzelne Photon „interferiert mit sich selbst“. Eine Beschreibung durch elektromagnetische Felder ist hier nicht mehr sinnvoll; das Streuverhalten folgt aus der Entwicklung der Wellenfunktion des Quantenobjektes.

Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass das Löschen der in einem Teil eines Versuchs gewonnenen Information durch weitere Elemente in wesentlich komplexeren Versuchsaufbauten für verschiedene quantenmechanische Variablen durchgeführt wurde. Insofern sind die hier vorgestellten Versuche die einfachste Realisierung einer Klasse von „Quantenradierern“ [6].

Referenzen

- [1] R. Hillmer, P. Kwiat: „A Do-It-Yourself Quantum Eraser“, Scientific American, 14. April, 2007; Spektrum der Wissenschaft, Juli 2007, S. 68
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer> und darin angegebene Referenzen; abgefragt März 2015.
- [3] http://pluslucis.univie.ac.at/FBW0/FBW2015/Material/index_Material_2015.html
- [4] C. Jönsson: „Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten“, Zeitschrift für Physik, Nr. 161/4 (1961), S. 454
- [5] D. Ertl: „Sechs Kernaspekte der Natur der Naturwissenschaft“, Plus Lucis 1-2/2013, S. 16
- [6] http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer#Experimentelle_Realisierung; abgefragt März 2015.

Wir danken Frau Priv.-Doz. Dr. Beatrix Hiesmayr für wertvolle Kommentare und Ergänzungen.