

VIII. Philosophische Aussagen der Quantenphysik



A. Ausgangslage

Die vorherigen Kapitel dieser Unterrichtseinheit haben in eindrücklicher Weise, so hoffen wir zumindest, aufgezeigt, dass die Quantenmechanik als eine ausserordentlich wertvolle und erfolgreiche wissenschaftliche Theorie angesehen werden kann. Alle von uns betrachteten atomaren Phänomene konnten mit Hilfe dieser Theorie elegant und ursächlich erklärt werden.

Die Quantenmechanik hat aber auch unseren Blick auf die Wirklichkeit und somit unser Weltbild in einschneidender Weise revolutioniert. Die Schülerinnen und Schüler können am Ende ihres gymnasialen Unterrichts mit dieser faszinierenden Ideenwelt in Berührung gebracht werden und auch erkennen, wie weitreichend der Beitrag der Naturwissenschaften zu unserem heutigen Weltbild ist.

Thema	Aussagen der Quantenmechanik über die Natur der physikalischen Wirklichkeit.
Ziel	<p>Die Schülerinnen und Schüler können die Grenzen der klassischen Physik erkennen und einsehen, dass die Quantenmechanik einen neuen und auch überraschenden Blick auf die Wirklichkeit ermöglicht.</p> <p>Sie können an folgenden Beispielen nachvollziehen, welche philosophischen Konsequenzen die von uns bis anhin erörterten Sachverhalte nach sich ziehen:</p> <ul style="list-style-type: none">• Doppelspaltversuch mit einzelnen Teilchen• Gedankenexperiment mit der Schrödinger'schen Katze• Grundlegende Unbestimmtheit der Quantenwelt <p>Es sei hier jedoch anzumerken, dass man in diesem Abschnitt den Lernenden generell eher einen ersten Kontakt mit den philosophischen Aussagen der Quantenmechanik ermöglichen sollte, denn ein vollständiges Verständnis im herkömmlichen Sinne dieses Wortes anzustreben.</p>
Vorwissen	Für diesen Abschnitt werden alle Erkenntnisse aus den vorangegangenen Lektionen vorausgesetzt.

B. Synopsis

Inhalte	Form	Material	Zeit
<p>EINSTIEG:</p> <p>Klassische Mechanik und Quantenphysik</p>	<p>Input LP</p> <p>Diskussion</p>	<p>PPP VIII.1</p>	
<p>DOPPELSPALTVERSUCH MIT EINZELNEN ELEKTRO- NEN:</p> <p>Doppelspaltversuch mit Licht und mit einem Elektronenstrahl</p> <p>Doppelspaltversuch mit einzelnen Elektronen</p> <p>Interpretation des Doppelspaltversuchs mit einzelnen Elektronen</p> <p>Doppelspaltversuch mit grösseren Teilchen (Atome und Moleküle)</p>	<p>Auftrag</p> <p>Auftrag</p> <p>Diskussion</p> <p>Diskussion</p>	<p>AB VIII.1</p> <p>AB VIII.2</p> <p>Videos VIII.1-3,</p> <p>PPP VIII.1</p> <p>Videos VIII.3-5</p> <p>PPP VIII.1</p>	
<p>GRUNDLEGENDE UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DER KLASSISCHEN PHYSIK UND DER QUANTENPHYSIK</p> <p>Grundlegende Unbestimmtheit</p> <p>Superposition</p> <p>Messproblem</p>	<p>Input LP</p>	<p>PPP VIII.1</p>	
<p>SCHRÖDINGERS KATZE</p> <p>Das Gedankenexperiment</p> <p>Deutung des Versuchs</p>	<p>Input LP</p> <p>Input LP</p> <p>Diskussion</p>	<p>PPP VIII.1</p>	
<p>VERTIEFUNG:</p> <p>Fragen zur Selbsterklärung</p>	<p>Auftrag</p>	<p>AB VIII.3</p> <p>AB VIII.4</p>	

C. Einstieg

Frage 1: Woher weiss man, wann die nächste Sonnenfinsternis stattfinden wird? Hier kann die Lehrkraft Vorschläge der Lernenden sammeln und ordnen und daraus dann die korrekte Antwort herausarbeiten.

Antwort: Die Bewegung der Himmelskörper können mit Hilfe der Newton'schen Gravitationsgesetze beliebig genau berechnet werden.

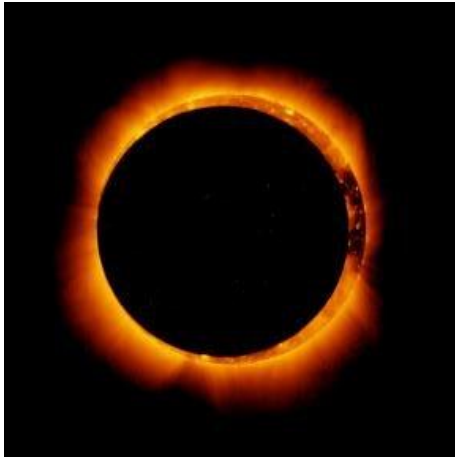


Abb. 1 Sonnenfinsternis gesehen am 21.05.2012 in Laughlin, Kalifornien¹

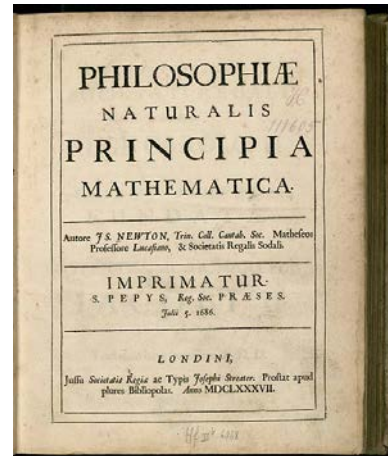


Abb. 2 Sir I. Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, 1687²

Eine in der Literatur häufig zu findende Möglichkeit, die philosophischen Konsequenzen der Quantenmechanik zu erklären, besteht darin, die Quantenmechanik der klassischen Newton'schen Physik gegenüberzustellen. Der Genius des Sir Isaac Newton ordnete unsere Welt und machte sie voraussehbar. Die Newton'schen Gravitationsgesetze erlauben uns, mit einer einzigen Formel die Bewegung eines fallenden Steines, einer Kanonenkugel und die Himmelsmechanik ursächlich zu erklären und somit die Welt als eine komplexe aber dennoch sich geordnet bewegende Maschine zu betrachten. Der Physiker R.P. Crease schreibt dazu:

“The arrival of the Newtonian universe was attractive, liberating and even comforting to many of those in the 17th and 18th centuries; its promise was that the world was not the chaotic, confusing and threatening place it seemed to be – ruled by occult powers and full of enigmatic events – but was simple, elegant and intelligible. Newton’s work helped human

¹ Wikimedia Commons, Sonnenfinsternis, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sk_sonnenfinsternis.jpg?uselang=de-ch, heruntergeladen am 17.4.2014

² Wikimedia Commons, *Principia Mathematica*, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_-_Principia_\(1687\),_title,_p._5,_color.jpg?uselang=de-ch](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_-_Principia_(1687),_title,_p._5,_color.jpg?uselang=de-ch), heruntergeladen am 17.4.2014

*beings to understand in a new way the basic issues that human beings seek: what they could know, how they should act and what they might hope for.”*³

Die Unschärfebeziehung, der Welle-Teilchen-Dualismus und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion haben bereits in der Anfangszeit der Quantenphysik aufgezeigt, dass das Zeitalter der geordneten und voraussehbaren Welt in den Dreissigerjahren des letzten Jahrhunderts zu Ende gegangen ist.

Das im Folgenden skizzierte Vorgehen besteht im Wesentlichen aus zwei grösseren Lernschritten. Im ersten Schritt werden die Lernenden sorgfältig an die Ergebnisse und die Interpretation des Doppelspaltversuches mit einzelnen Elektronen herangeführt. Dieser Versuch verkörpert, wie kein anderer, das Wesen der Quantenphysik und ist, nebenbei erwähnt, von mehr als 200 Physikerinnen und Physiker zum schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten erkoren worden⁴.

Im zweiten Lernschritt werden die grundlegenden Unterschiede zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik erarbeitet und anhand des Gedankenexperiments „Schrödingers Katze“ illustriert.

D. Doppelspaltversuch mit einzelnen Elektronen

Bereits im Kapitel I „*Natur des Lichts*“ haben wir den Doppelspaltversuch kennengelernt. Im Folgenden seien die von uns bis anhin erwähnten Varianten dieses Experiments kurz repetiert. Die hier skizzierte Abfolge der Lernschritte kann von den Lernenden selbstständig in den beiden Arbeitsblättern VIII/1 und VIII/2 erarbeitet werden. Begleitend dazu kann den Lernenden die PowerPoint-Präsentation PPP VIII/2 „Doppelspaltversuch“ zur Verfügung gestellt werden.

Doppelspaltversuch mit makroskopischen Teilchen

Werfen wir Tennisbälle auf eine Wand mit Doppelspalt, so ist es offensichtlich, dass wir das folgende Muster erhalten werden.

³ R. P. Crease, *Critical Point: The Quantum Moment*, Physics World **26**, 3, (2013) S. 25 – 27.
<http://physicsworld.com/cws/download/mar2013>, heruntergeladen am 17.4.2013

⁴ R. P. Crease, *The most beautiful experiment*, Physics World **15**, 9, (2002) S. 19 – 20

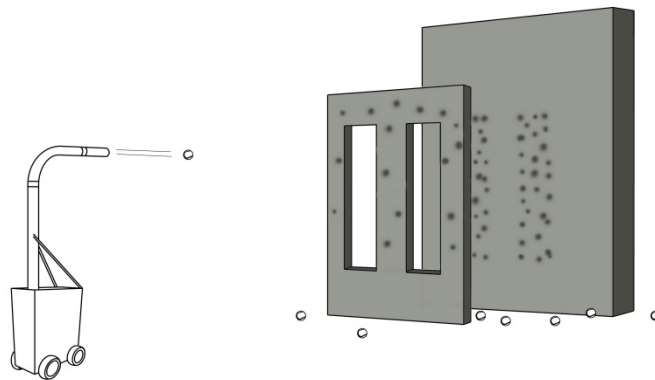


Abb. 3 Spuren von Tennisbällen nach dem Durchgang durch einen Doppelspalt

Video VIII/1: Doppelspaltversuch mit Murmeln⁵ (enthalten in der PPP VIII/1)

Doppelspaltversuch mit einem Lichtstrahl

Die bei diesem Versuch erstmals von Thomas Young im Jahre 1801 beobachtete Interferenzerscheinung war uns ein Hinweis für die Wellennatur des Lichts.

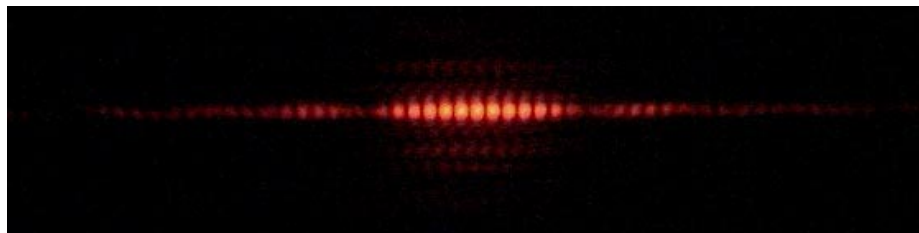


Abb. 4 Ergebnis des Doppelspaltversuchs mit Licht⁶

Video VIII/2 Doppelspaltversuch mit Licht (enthalten in der PPP VIII/1)

Doppelspaltversuch mit einem Elektronenstrahl

Davison und Germer konnten im Jahre 1927 die Beugung eines Elektronenstrahls an einem atomaren Gitter beobachten und lieferten damit erstmals den experimentellen Beweis für die Wellennatur des Elektrons.

⁵ Dr. *Quantums rätselhafte Quantenwelt: Der Doppelspalt-Versuch*, <http://www.youtube.com/watch?v=3ohjOltaO6Y>, heruntergeladen am 19.12.2013

⁶ Wikipedia, *Double Slit Pattern*, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Single_slit_and_double_slit2.jpg, heruntergeladen am 24.4.2014

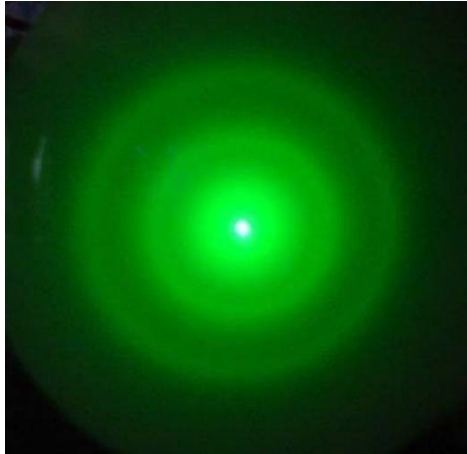


Abb. 5 Beugungsmuster bei Elektronen⁷

Das eigentliche Doppelspaltexperiment mit Elektronen wurde dann im Jahre 1961 von Claus Jönsson durchgeführt.



Abb. 6 Das historische Bild von C. Jönsson: Interferenz beim Durchgang von Elektronen durch einen Doppelspalt⁸

Video VIII/3 Doppelspaltversuch mit Elektronen (enthalten in der PPP VIII/1)

Es ist bei den oben aufgeführten Experimenten zu betonen, dass in beiden Fällen ein Strahl (Lichtstrahl und Elektronenstrahl) verwendet wurde, welcher (im Teilchenbild) viele Photonen oder Elektronen enthielt. Man kann sich also gut vorstellen, dass beispielsweise die vielen im Strahl enthaltenen Lichtwellen (im Wellenbild) miteinander interferieren und das beobachtete Interferenzmuster bilden.

⁷ Bild: M. Zuch, *Elektronenbeugung*, http://www.ulfkonrad.de/pdf_s/referate/malte/elektronenbeugung.htm, heruntergeladen am 18.11.2013

⁸ Wikimedia Commons, *Das historische Foto aus Jonssöns Originalarbeit*, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Claus_J%C3%B6nsson_Interferenz.jpg?uselang=de, heruntergeladen am 8.5.2014

Da ja sowohl das Licht als auch die Elektronen auch Teilchencharakter aufweisen, kann man sich eine experimentelle Anordnung vorstellen, in der **einzelne** Photonen oder Elektronen durch einen Doppelspalt geschickt werden.

Zu diesem Zeitpunkt ist es ausserordentlich wichtig, dass die Lehrkraft die experimentellen Einzelheiten dieses Versuchs genau erläutert. Dies ermöglicht es den Lernenden, die volle Tragweite der Ergebnisse zu erfassen. Dies ist bei diesem Versuch und seiner Interpretation von besonderer Bedeutung.

Vereinfacht kann das experimentelle Vorgehen beim Doppelspaltversuch mit einzelnen Elektronen folgendermassen beschrieben werden (Abb. 7): Eine Elektronenquelle feuert ein einzelnes Elektron auf einen Doppelspalt. Nach dem Durchgang durch den Doppelspalt trifft das Elektron auf eine Fotoplatte auf und hinterlässt dort eine Spur. Anschliessend lässt man eine Zeit verstreichen und feuert aus der Elektronenquelle ein weiteres Elektron ab, welches ebenfalls eine Spur auf der Fotoplatte hinterlässt. Dies wiederholt man so lange, bis sich auf der Fotoplatte ein eindeutiges Muster abzeichnet.

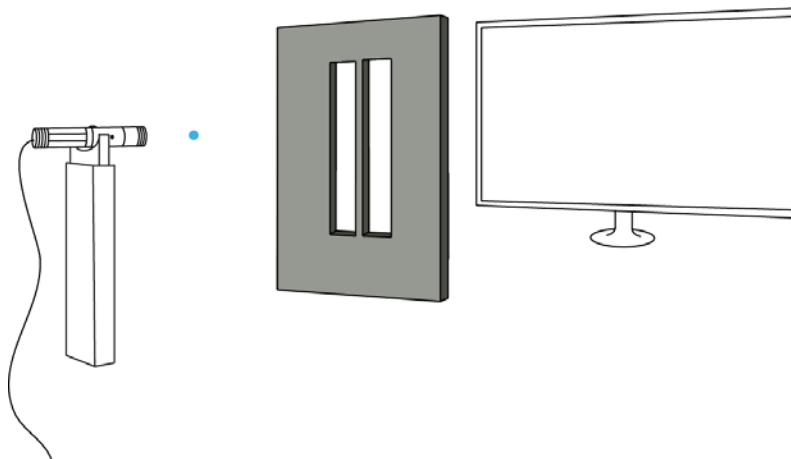


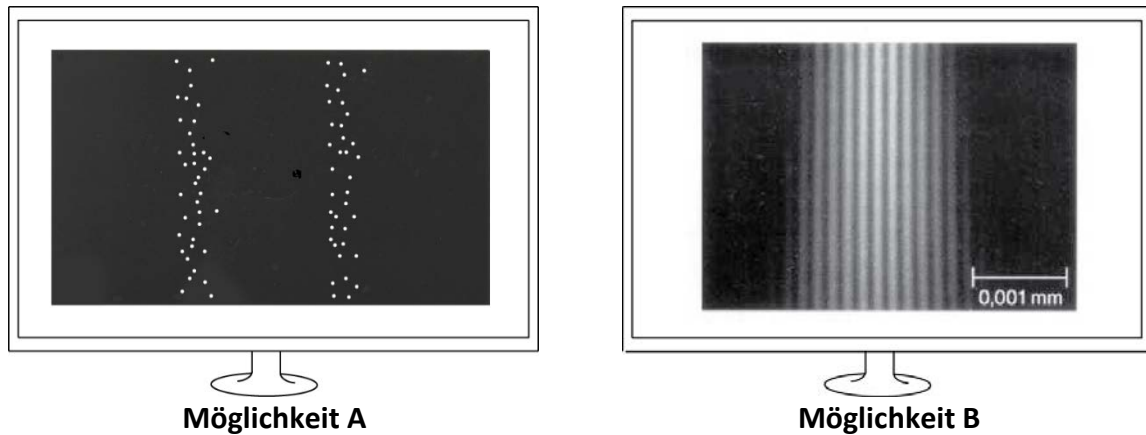
Abb. 7 Eine Elektronenquelle feuert ein einzelnes Elektron auf einen Doppelspalt ab

Die nun folgende Frage 2 führt zu einem der wichtigsten Aspekte der Quantentheorie, was in der vielzitierten Aussage des Nobelpreisträgers R. Feynman besonders deutlich wird.

*„... Zur Untersuchung wählen wir ein Phänomen aus, das auf klassische Art zu erklären **absolut** unmöglich ist und das in sich den Kern der Quantenmechanik birgt. In Wirklichkeit enthält es das **einzig** Geheimnis. ...“⁹*

Frage 2: Welche der beiden unten aufgeführten Möglichkeiten sollen wir erwarten, wenn man nun einzelne Elektronen durch den Doppelspalt schickt und nach jedem Elektron genügend lange wartet, bis das vorherige Elektron auf der Fotoplatte aufgetroffen ist?

⁹ R. P. Feynman, R. B. Leighton und M. Sands, *Feynmans Vorlesungen über Physik*, Band III, S. 2, 5. Auflage, Oldenburg Verlag München Wien, 2006



Es ist anzunehmen und es entspricht vollends der langjährigen Erfahrung des Autors, dass die meisten Lernenden voraussagen werden, dass einzelne Elektronen beim Durchgang durch den Doppelspalt ein Muster gemäss der Möglichkeit A erzeugen.

Siehe hierzu auch das **Video 3** enthalten in der PPP VIII/1

Mit der Entwicklung der Technik rückte der Doppelspaltversuch mit einzelnen Elektronen in die Reichweite der Experimentatoren. Den ersten Erfolg verzeichneten Physiker an der Universität Bologna in Italien im Jahre 1976¹⁰.

Video 4: In der unten zitierten schön gestalteten Website findet man eine Videoaufnahme des Versuchs und viele Hintergrundinformationen. Dieses Video ist auf der CD zu dieser Unterrichtseinheit enthalten, da der Link zum Herunterladen nicht mehr aktiv ist.

Video 5: Im Jahre 1989 führte A. Tonomura bei der Firma Hitachi in Japan ein ähnliches Experiment mit einer etwas besseren technischen Ausrüstung durch¹¹. Auch hier kann ein Video von der zitierten Website heruntergeladen werden. Auch dieses Video ist in der PowerPoint-Präsentation PPP VIII/2 enthalten.

Die experimentellen Ergebnisse (Abb. 8) zeigen auf, dass auch wenn die Elektronen einzeln durch den Doppelspalt durchgehen, sich ein Interferenzmuster auf dem Schirm ausbildet. Hier empfiehlt sich natürlich, die verschiedenen Phasen des Experiments (a bis e) nicht alle auf einmal den Schülerinnen und Schülern zu zeigen, sondern nacheinander, um die Spannung aufrecht zu erhalten. Noch eine bessere Möglichkeit bietet das Vorspielen des in der PowerPoint-Präsentation integrierten Videos von A. Tonomura.

¹⁰ University of Bologna, *The most Beautiful Experiment*, <http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/english/index.html>, heruntergeladen am 8.5.2014

¹¹ Hitachi, *Double-slit Experiment*, <http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/doubleslit.html>, heruntergeladen am 8.5.2014

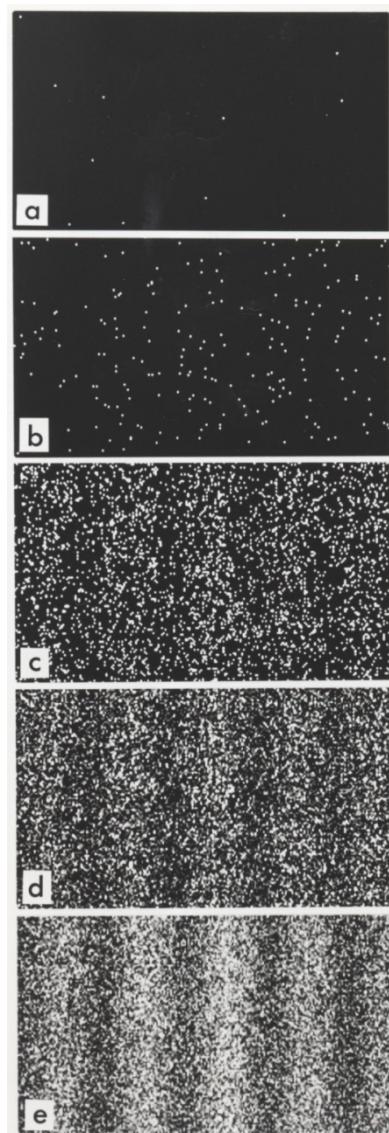


Abb. 8 Ergebnisse des Doppelspaltversuches mit einzelnen Elektronen¹²
 a = 11 Elektronen, b = 200 Elektronen, c = 6000 Elektronen,
 d = 40 000 Elektronen und e = 140 000 Elektronen

Interpretation des Doppelspaltexperimentes mit einzelnen Elektronen

Angesichts der Tatsache, dass die in diesem Abschnitt erörterten Sachverhalte an die Grenzen der intellektuellen Möglichkeiten der jungen Erwachsenen stossen, sollte man die Schülerinnen und Schüler zuerst die Arbeitsblätter VIII/1 und VIII/2 mit Hilfestellung der Lehrkraft durcharbeiten lassen und anschliessend den gesamten Sachverhalt im Klassenzimmer nochmals eingehend erklären und diskutieren.

Wie können die Wellen, welche die einzelnen Elektronen beschreiben, ein Interferenzmuster bilden, wenn die Elektronen zu verschiedenen Zeiten durch den Doppelspalt durchgehen und die Wellen somit nicht miteinander interferieren können? Oder anders gefragt: „Woher

¹² Wikimedia Commons, Double-slit experiment results Tonomura,
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_2.jpg, heruntergeladen am 8.5.2014

weiss das einzelne Elektron, wo es auf dem Schirm auftreffen muss, damit es mit den anderen Elektronen, die nach ihm abgefeuert worden sind, ein Interferenzmuster bilden kann?“

Ende des Auszugs