



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Quantenmechanik im Internet und ihre Verwendbarkeit im Unterricht

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat.)

| | |
|--|--|
| Verfasserin / Verfasser: | Franz Spiesmeier |
| Matrikel-Nummer: | 9806686 |
| Studienrichtung (lt. Studienblatt): | A 412 406 LA Physik, LA Mathematik |
| Betreuerin / Betreuer: | O. Univ.-Prof. Dr. Herbert Pietschmann |

Wien, am 1.11.2008

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und außer dem im Literaturverzeichnis angeführten Schrifttum bei der Abfassung keine Unterstützung in Anspruch genommen habe. Die Arbeit ist noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Wien, im November 2008

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mir bei der Erarbeitung meiner Diplomarbeit geholfen haben.

Mein herzlicher Dank gilt O. Univ.-Prof. Dr. Herbert Pietschmann für die Betreuung meiner Arbeit und die viele Zeit die er für mich investierte.

Abschließend gilt mein Dank meinen Eltern, die mir mein Studium finanzierten und mich dabei unterstützten.

| | |
|---|----|
| Geschichtliches | 10 |
| Quantenmechanik in der Schule | 10 |
| Der Lehrplan | 10 |
| Didaktische Grundsätze: | 10 |
| Methodenwahl: | 11 |
| Bildungsziele: | 12 |
| Der photoelektrische Effekt | 12 |
| Der Compton-Effekt | 13 |
| Der Franck-Herz-Versuch | 13 |
| Die de Brogliesche Welle | 14 |
| Heisenbergsche Unschärferelation | 14 |
| Der Tunneleffekt | 15 |
| Quantenmechanik im Internet | 16 |
| Auswahlgründe und kurze Beschreibungen | 17 |
| Quantenmechanik | 17 |
| Quanten-Gickse | 17 |
| milq Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik | 18 |
| Quantentheorie: | 18 |
| Einführung in Quantenmechanik | 19 |
| Quantenmechanik – online | 19 |
| Quantentheorie | 20 |
| Links ist nicht das Gegenteil von Rechts: | 21 |
| Der Doppelspaltversuch – Einstieg in die Quantentheorie: | 21 |
| Die Rolle des Beobachters in der Quantentheorie: | 24 |
| Gibt es leere Quantenwellen? | 25 |
| Niels Bohrs Atommodell: | 28 |
| Schrödingers Katze: | 30 |
| Der Quanten-Zenon Effekt: | 32 |
| Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen drehen: | 34 |
| Das Einstein-Podolsky-Rosen Experiment: | 36 |
| Komplementäre Größen: | 39 |
| Resonanzphänomene: | 41 |
| Antimaterie: | 42 |
| milq | 45 |

| | |
|--|----|
| 1. Photonen | 46 |
| 2. Präparation | 48 |
| 3. Wellen und Teilchen | 50 |
| 4. Die statistischen Aussagen der Quantentheorie | 55 |
| 5. Elektronen | 56 |
| 6. Der quantenmechanische Messprozess | 59 |
| 7. Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation | 62 |
| 8. Der Weg zur Schrödingergleichung | 64 |
| 9. Übersicht über den quantenmechanischen Formalismus | 67 |
| 10. Potentiale | 69 |
| 11. Der Tunneleffekt | 71 |
| 12. Hinführung zum quantenmechanischen Atommodell | 73 |
| 13. Energiewerte des Wasserstoff-Atoms durch Kastenpotential-Näherung | 75 |
| Einführung in Quantenmechanik | 78 |
| Wofür Quantenmechanik?: | 79 |
| Was ist Quantenmechanik? | 79 |
| Was ist Quantenmechanik NICHT? | 79 |
| Schwachpunkte der Quantenmechanik: | 80 |
| FAQ's zur Quantenmechanik:..... | 80 |
| Quanten-Gickse | 81 |
| Quanten-Gickse: | 82 |
| EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung für Gickse: | 83 |
| Teleportation von Quanten-Gicksen | 85 |
| Quantenmechanik – online | 87 |
| Wie schauen eigentlich die Atome aus?..... | 88 |
| Unser heutiges Verständnis von Atomen:..... | 88 |
| Bilder von elektronischen Zuständen des Atoms:..... | 89 |
| Ein geworfener Tennisball: | 90 |
| Die quantenmechanische Wellenfunktion: | 91 |
| Die Unschärferelation: | 92 |
| Die Farben der Wellenfunktion:..... | 93 |
| Komplexe Zahlen – ein mathematischer Ausflug:..... | 93 |
| Teilchen und Wellen: | 94 |
| Ebene Wellen: | 94 |

| | |
|---|-----|
| Welleneigenschaften: | 95 |
| Superpositionsprinzip: | 95 |
| Interferenz: | 95 |
| Wellenpakete und Unschärferelation: | 97 |
| Quantenmechanik | 98 |
| Beschreibung der Theorie: | 99 |
| Philosophische Fragen: | 101 |
| Schlüsselexperimente/Gedankenexperimente: | 101 |
| Interpretation: | 101 |
| Anwendungen: | 101 |
| Erweiterungen: | 101 |
| Geschichte: | 102 |
| Einige Zitate: | 102 |
| Gesamtbeurteilung | 103 |

Quantenmechanik

Geschichtliches

Das Jahr 1900 gilt als Geburtsjahr der Quantenphysik.

- 1900 Max Planck veröffentlicht eine Abhandlung über schwarze Strahlung. Er stellt die Hypothese auf, dass der Energieaustausch zwischen Materie und elektromagnetischen Wellen in Energiequanten geschieht und definiert das Plancksche Wirkungsquantum.
- 1905 Einstein stellt die Hypothese auf, dass elektromagnetische Strahlungsenergie selbst in Form von Lichtquanten auftreten.
- 1913 Niels Bohr wendet die Quantenmechanik auf das Rutherfordsche Atommodell an.
- 1923 Louis de Broglie stellt die Hypothese auf, dass der Welle-Teilchen Dualismus auch für Materie, wie zum Beispiel Elektronen, gilt.
- 1925 Erwin Schrödinger bringt die Hypothese von de Broglie in mathematische Form, was als die Schrödingergleichung bekannt wird.
- 1927 Werner Heisenberg stellt seine Unbestimmtheitsrelation auf, die die Unfähigkeit beschreibt zwei Messwerte beliebig genau zu bestimmen.

In den letzten Jahren gelingt es Anton Zeilinger mit Hilfe von EPR Paaren Eigenschaften von Teilchen zu transportieren.

Quantenmechanik in der Schule

Der Lehrplan

Didaktische Grundsätze:

Laut Oberstufenlehrplan der Physik soll verhindert werden, dass die Schüler frühzeitig abstrahieren und durch das Einbinden audiovisueller Medien in den Unterricht soll das erreicht werden.

Mit Internetseiten kann das sehr leicht realisiert werden.

Der Physikunterricht soll zu einem übergeordneten Einblick in die Physik führen und sich an Anwendungsbereichen der Physik und der Erfahrungswelt der Schüler orientieren.

Auch das kann man mithilfe von Internetseiten sehr leicht erreichen, da auf den meisten Seiten Links zu anderen Gebieten der Physik angegeben sind. Dadurch kann man sich relativ leicht einen Überblick über das Gebiet verschaffen. Ebenso findet man die verschiedensten Seiten über die Anwendungsmöglichkeiten der bearbeiteten Themen.

Methodenwahl:

Im Lehrplan wird verlangt, dass die Schüler empirisches und erfahrungsgeleitetes Lernen beherrschen sollen. Das Zusammenspiel zwischen Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfenden Experimenten sowie die Formulierung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten als physikalische Methode sollen im Unterricht behandelt werden.

Das Internet bietet verschiedene Informationen und Hypothesen zu diversen Themen. Mit etwas Geschick findet man hier auch Programme, die Versuche simulieren, die man in einer Schule nicht oder nur sehr ungenau durchführen kann.

So könnten die Schüler parallel zum Unterricht oder in Heimarbeit das Entwickeln von Theorien erlernen.

Schüler sollen durch realistische und für sie relevante Probleme dazu motiviert werden sich neues Wissen zu erwerben. Dabei soll auf aktuelle Probleme eingegangen und die unterschiedlichen Interessenlagen von Burschen und Mädchen beachtet werden.

Da die meisten Schüler regelmäßig im Internet surfen, ist es leichter sie dazu zu bringen sich im Internet über ein Stoffgebiet zu informieren als in Büchern. Aktuelle Themen sind im Internet schneller verfügbar als in der entsprechenden Fachliteratur.

Die Schüler sollen in der Lage sein unter verschiedenen Blickwinkeln zu lernen. Da man im Alltag immer unvollständige Informationen zur Verfügung hat, muss man die vorhandenen Fakten gewichten. Unterschiedliche Gewichtungen führen zu unterschiedlichen Schlüssen. Schüler sollen auch lernen wie man mit divergierenden Expertenmeinungen umgehen kann.

Da die Autoren der Internetseiten oft verschiedene Interpretationen und Sichtweisen zu den verschiedenen Themen veröffentlichen, muss man diese Informationen immer genau beleuchten, ob man ihre Interpretationen verwenden kann.

Die Schüler sollen im sozialen Umfeld und auch durch Kooperation mit Experten Probleme lösen lernen.

Dies kann im Internet leicht realisiert werden, da man die Schüler und die Experten leichter in Chaträumen als real zusammenbekommt. Es stehen auch viele Artikel und Kommentare von Experten im Internet auf die die Schüler zugreifen können.

Die Schüler sollen ihrem Leistungsvermögen entsprechend sowohl angeleitet als auch eigenverantwortlich lernen.

Um eigenverantwortlich zu lernen, gibt es zwei Möglichkeiten. Die Schüler können in Büchern nachschlagen, die zwar gesicherte Quellen darstellen, aber nicht immer leicht zu erhalten sind. Oder sie können auf Quellen aus dem Internet zugreifen, die sehr leicht erreichbar sind, aber man kann ihnen nicht immer vorbehaltlos vertrauen.

Bildungsziele:

Die im Unterricht zu behandelnden Themen und die Beschreibungen habe ich aus dem Lehrbuch Sexl – Kühnelt – Stadler – Jakesch Physik 4 entnommen. Meines Wissens ist es eines der am meist verbreiteten Schulbücher. Außerdem glaube ich, dass es von den mir bekannten Schulbüchern eines der besten ist, da es viele Abbildungen vorweisen kann und die Texte sehr leicht verständlich sind.

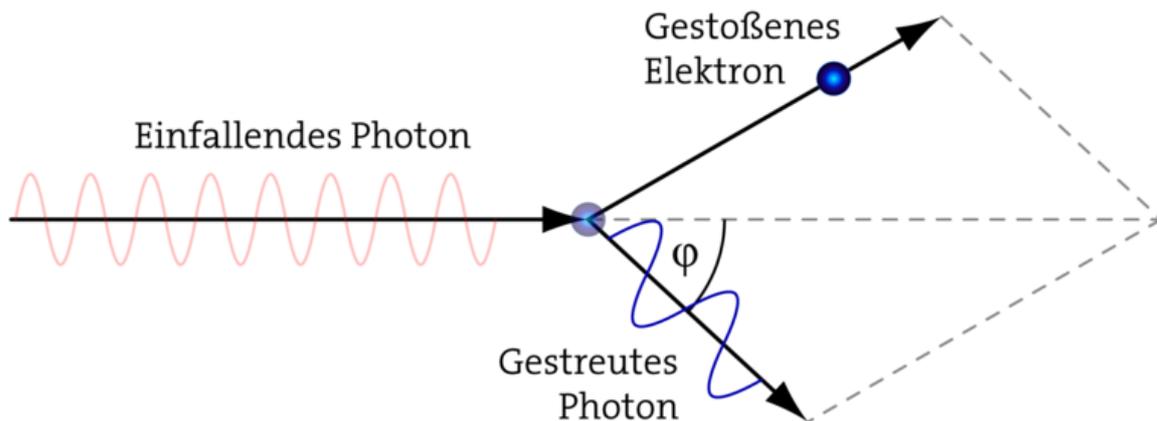
Der photoelektrische Effekt

Beim photoelektrischen Effekt werden durch Lichtquanten Elektronen aus einer Metalloberfläche herausgelöst. Die Energie der herausgelösten Elektronen wird durch die Frequenz des einstrahlenden Lichts bestimmt. Wird die Intensität der Lichtquelle erhöht, werden mehr Elektronen abgegeben, an ihrem Energiezustand ändert sich aber nichts. Dieser Effekt wurde dadurch erklärt, dass man diskrete Lichtquanten, so genannte Photonen, mit der Energie $\hbar \cdot \omega$ annahm. Bei den Versuchen wurde eine materialabhängige Grenzfrequenz festgestellt, bei der Elektronen ausgelöst werden.

Der Compton-Effekt

Wenn man Röntgenstrahlen an Elektronen streut, kann man eine Frequenzverschiebung beobachten. Diese hängt vom Streuwinkel ab.

Bild: ¹



Bei dem Stoß verliert das Photon einen Teil seiner Energie und die Wellenlänge wird größer. Die Energie des gestreuten Teilchens ist direkt proportional zur Energie des Photons.

Durch dieses Experiment wurde die Existenz von Lichtquanten experimentell bestätigt.

Der Franck-Herz-Versuch

Bei diesem Versuch wird durch eine mit Quecksilberdampf gefüllte Röhre Strom geleitet. Dieser wird als Funktion der Spannung gemessen und dadurch erhält man eine Strom-Spannungs-Charakteristik.

Die Elektronen können die Röhre ohne Energieverlust passieren solange ihre Energie 4,9 eV nicht übersteigt. Sobald aber die Energie der Elektronen 4,9 eV übersteigt, sinkt der Strom fast auf Null. Durch einen Stoß nimmt das Quecksilberatom die Energie des Elektrons auf und daher geht die kinetische Energie des Elektrons auf Null. Das Quecksilberatom strahlt dann die Energie wieder mit einer charakteristischen Wellenlänge ab. Wird die Spannung weiter

¹http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Compton_scattering-de.png

erhöht, behalten die Elektronen einen Teil ihrer kinetischen Energie und der Vorgang wiederholt sich.

Mit diesem Versuch kann man die Existenz diskreter Energiezustände im Quecksilber zeigen.

Die de Brogliesche Welle

De Broglie stellte die Vermutung auf, dass Welleneigenschaften von Photonen auch auf Elektronen zutreffen könnten.

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$E = h \cdot f$$

Mit dieser Theorie konnte er die Stabilität der Atomkerne erklären.

Die Theorie wurde experimentell dadurch bestätigt, dass man beobachten konnte, wie Elektronen an einer Lochblende gebeugt werden.

Der Durchmesser d der Öffnung muss zirka die gleiche Dimension wie die Wellenlänge des Elektrons haben. Diese kann man aus der kinetischen Energie bestimmen.

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m \cdot \lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot E}}$$

Heisenbergsche Unschärferelation

Die Bahn eines Elektrons lässt sich nur bis zu einem bestimmten Grad genau bestimmen. Um das zu tun schickt man einen Elektronenstrahl durch eine Lochblende. Nähert sich der Blendendurchmesser der Größe einiger de Broglie-Wellenlängen, beginnt die Elektronenwelle auseinanderzulaufen.

Daraus folgt, dass die Teilchenbahnen nicht mit beliebiger Genauigkeit festgelegt werden können.

Will man den Ort eines Elektronenstrahls genau bestimmen, muss man eine Ungenauigkeit beim Impuls und der Geschwindigkeit hinnehmen.

Heisenbergsche Unschärferelation:

Ort und Impuls und auch Energie und Zeit können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden.

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

$$\Delta E \cdot \Delta t = h$$

Der Tunneleffekt

Der α -Zerfall war lange Zeit ein Rätsel. Man konnte sich nicht erklären wie der α -Kern die nötige Energie aufbringen kann um die Kernkraft zu überwinden.

U-238 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 4,5 Mrd. Jahren zu Th-238. Dabei emittiert es einen α -Kern mit einer Energie von 4 MeV. Zum Überwinden der Kernkraft würde der α -Kern aber ca. 40 MeV benötigen. Wenn die Kernkraft überwunden ist, stoßen sich die beiden Kerne ab.

Durch die Unschärferelation kann der α -Kern für kurze Zeit die benötigten 40 MeV aufbringen um sich vom Kern zu lösen.

$$\Delta E \cdot \Delta t = h$$

Gelingt es dem α -Kern in dieser Zeit die nötige Entfernung vom Kern zu erreichen, kann er sich vom Kern lösen. Da ΔE sehr groß ist, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Ablösung sehr gering.

Eine Anwendung findet der Tunneleffekt im Rastertunnelmikroskop.

Quantenmechanik im Internet

Das Auffinden geeigneter Seiten im Internet zum Thema Quantenphysik ist schwieriger als ich ursprünglich gedacht habe. Die meisten Seiten, die man über Quantenphysik findet, bestehen nur aus einigen Zeilen oder Formeln. Diese Seiten eignen sich daher überhaupt nicht für den Unterricht, zum Selbststudium der Schüler oder zur Vertiefung des vorgetragenen Stoffes. Um brauchbare Internetseiten zu erhalten, darf man nicht den allgemeinen Begriff „Quantenphysik“ in die Suchmaschinen eingeben, sondern muss nach speziellen Unterkapiteln suchen. Die Seiten, die man auf diese Weise findet, sind meistens nicht nur auf ein Gebiet der Quantenmechanik beschränkt, sondern bearbeiten gleich mehrere Teilgebiete. Manche Autoren befassen sich auf ihren Homepages auch mit anderen Bereichen der Physik oder überhaupt mit anderen Wissenschaften. Beim Inhalt der meisten Internetseiten muss man sehr vorsichtig sein, da sie nicht immer wissenschaftlich fundiert sind. Viele Seiten führen das behandelte Thema nicht sehr genau aus oder lassen Einzelheiten weg, die zum besseren Verständnis beitragen könnten.

Bessere Ergebnisse bei der Internetsuche kann man auch dadurch erreichen, dass man nicht immer dieselbe Suchmaschine verwendet, sondern verschiedene durchprobiert. Jede Suchmaschine liefert andere Ergebnisse.

Ich habe mich hauptsächlich auf Internetseiten konzentriert, die mehrere Themen der Quantenmechanik behandeln, weil ich finde, dass diese Seiten am geeignetsten für den Unterricht sind. Die kurzen Seiten bieten meistens nur einen sehr punktuellen Einblick in die Quantenmechanik, aber keine weiteren Erklärungen oder Vertiefungen. Daher ist es kaum möglich sich mit der Quantenmechanik vertraut zu machen. Auf den größeren Seiten kann man sich einen besseren Überblick über die Zusammenhänge der Quantentheorie verschaffen. Meistens wird in den einzelnen Kapiteln auf andere Kapitel verwiesen, die den Aufbau, die Zusammenhänge und die Struktur der Quantentheorie besser ersichtlich machen.

Außerdem muss man den Schülern nicht verschiedene Internetseiten vorlegen, die unterschiedliche Formate, Schreibweisen und Ausdrücke verwenden. Ich habe auch nur Seiten verwendet, die Kapitel behandeln, die auch im Lehrplan für Physik enthalten sind.

Auswahlgründe und kurze Beschreibungen

Quantenmechanik

Die Seite aus der Wikipedia habe ich deshalb aufgenommen, weil die meisten Internetuser die Wikipedia kennen und sie deshalb sicher zuerst dort nachsehen werden.

Auf dieser Seite werden mehrere Gebiete der Quantenmechanik beschrieben. Die meisten sind aber nur sehr kurz abgehandelt und bringen keinen tieferen Einblick. Sucht man aber nach speziellen Phänomenen der Quantenmechanik in der Wikipädiadatenbank, findet man oft genauere Beschreibungen.

Diese Seite ist aber für den Unterricht weniger geeignet, da man nicht weiß, wer sie verfasst hat und sie auch oft verändert wird.

Diese ständigen Veränderungen machen es schwer ein Konzept für die Schüler zu erstellen. Die Seite ist auf keinen Fall für das Alleinstudium oder als Vorbereitung der Schüler auf das Stoffgebiet geeignet. Erst wenn die Schüler ein bestimmtes Grundwissen haben, ist es sinnvoll für sie, die Wikipädiadatenbank zu verwenden. Man kann aber einige Auszüge dieser Seite durchaus im Unterricht verwenden.

Quanten-Gickse

Diese Seite behandelt drei verwandte Themen der Quantenmechanik. Was mir an den Quantengicksen besonders gefällt, sind die eingebauten Animationen und sehr anschaulichen Programme. Hier können die Schüler an den Quantengicksen einzelne Versuche durchführen und dabei beobachten wie sich die Messgrößen verändern.

So ist es sicher für die Schüler interessanter und leichter zu verstehen, als wenn alles nur durch Text und Formeln erklärt wird.

Es wird mit einer kurzen klassischen Einleitung begonnen. Unter zu Hilfenahme der animierten Köpfe werden danach noch sehr anschaulich die Unschärferelation, das EPR-Paradoxon und Anton Zeilingers Teleportationsexperiment erklärt.

milq Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik

Die milq-Seite wurde deshalb aufgenommen, weil die Inhalte dem Lehrplan entsprechen und sie für Schüler leicht verständlich aufgearbeitet sind. Es gibt auch einige kleine Programme, Animationen und farbige Bilder die den Text auflockern und leichter verständlich machen.

Wie schon der Titel sagt ist diese Seite hauptsächlich für Lehrer und Lehrerinnen gedacht um darauf ihren Unterricht aufzubauen. Für die Schüler ist sie zu lang und die angeführten Formeln sind ohne zusätzliche Erklärung nur schwer zu verstehen. Teile der Seite sind nicht für den Unterricht verwertbar, da sie die Schüler überfordern würden. Die auf dieser Seite verlinkten Programme sind dazu gedacht, sie den Schülern anstelle der realen Experimente vorzuführen, die selten die exakten Ergebnisse liefern. Leider ist dies in Österreich aber nicht möglich, da nach den allgemeinen Geschäftsbedingungen der Seite die Programme nur in deutschen Schulen verwendet werden dürfen.

Außerdem hatte ich schon beim Downloaden der Programme öfters Schwierigkeiten.

Quantentheorie:

Der Autor dieser Seite hat eine interessante Auswahl aus der Quantenmechanik getroffen und er hat einige Themen nicht mit den Standardexperimenten, sondern mit eher weniger bekannten Experimenten erläutert.

Die Seite ist in einzelne Unterseiten aufgeteilt, die jeweils ein eigenes Kapitel behandeln. Dadurch kann man sehr leicht jene Kapitel für den Unterricht herausnehmen, die man gebrauchen kann.

Um auf ein anderes Kapitel zu kommen, muss man immer wieder auf die Startseite zurückgehen. Auf dieser ist zu jedem Kapitel eine kurze Inhaltsangabe angegeben.

Die einzelnen Stoffgebiete sind teilweise nicht leicht zu verstehen, obwohl sie sehr ausführlich erklärt werden. Teile dieser Seite übersteigen den Rahmen des Lehrplanes und sind eher nur als Ergänzung, zum Beispiel in einem Wahlpflichtfach, zu empfehlen.

Einführung in Quantenmechanik

Die Seite „Einführung in die Quantenmechanik“ gibt einen kurzen Einblick in die Quantenmechanik. Man kann aber nur Teile sinnvoll im Unterricht verwenden.

Auf dieser Seite wird kurz mit der klassischen Mechanik angefangen und dann zur Quantenmechanik übergegangen.

Es werden keine Kapitel aus der Quantenmechanik genau besprochen, sondern es werden nur einige Schlagworte aus der Quantenmechanik angeführt und kurz erklärt. Die den meisten Leuten bekannten quantenmechanischen Phänomene wie zum Beispiel Schrödingers Katze und der quantenmechanische Schifahrer sind hier angeführt.

Quantenmechanik – online

Die Vorteile der Quantenmechanik-online-Seiten sind die farbigen teils dreidimensionalen Bilder und Kurzfilme, die das Vorstellungsvermögen der Schüler fördern können.

Es werden hier hauptsächlich die Welleneigenschaften quantenmechanischer Teilchen besprochen und Themen die damit eng zusammenhängen. Die Ausführungen sind eher kurz gehalten und können am Ende des Kapitels zur Vervollständigung dienen. Die Beiträge sind auch leichter zu lesen als manche längere detailliertere Texte dieser Art.

Diese Seite ist auch in mehrere Unterseiten aufgeteilt die über die Startseite aufgerufen werden können. Hier ist es aber auch möglich von einer Seite auf die vorherige oder auf die nächste Seite zu wechseln, ohne vorher wieder auf die Startseite zu gehen.

Im folgenden Abschnitt sind die von mir ausgewählten Internetseiten genauer beschrieben.

Quantentheorie

<http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/quantentheorie.html>

Aufbau:

Diese Homepage ist in mehrere Gebiete unterteilt. Neben der Physik gibt es auch Beiträge über Philosophie und Evolution. Der Physikbereich ist in Relativitätstheorie, Quantenmechanik, Kosmologie und Klassische Physik eingeteilt. Der Bereich über die Quantenmechanik ist in zwölf Unterkapiteln gegliedert. Auf der Startseite gibt es zu jedem Kapitel einen kleinen Auszug.

Es sind auch einige Bücher angeführt, welche die Themen der Homepage bearbeiten.

Design:

Auf den meisten Seiten sind Bilder und Grafiken angeführt. Ansonsten sind die Seiten ziemlich schlicht gehalten.

Voraussetzungen:

Die Texte sind sehr leicht verständlich und können meistens ohne besondere Vorkenntnisse verstanden werden. Manche Begriffe werden aber nur erwähnt und nicht erklärt. Es werden nur wenige Formeln verwendet und die Versuche werden mit Hilfe von Bildern und Grafiken dargestellt.

Links:

In den einzelnen Beiträgen sind Links zu den anderen Kapiteln der Homepage und zur Literaturangabe vorhanden. Es gibt auch einen Link zu einem Verlag, wo man das Buch des Autors kaufen kann, in dem quantenmechanische und relativistische Phänomene in den Alltag transportiert werden.

Links ist nicht das Gegenteil von Rechts:

Auf dieser Seite gibt es eine Abbildung, die die Abgabe eines Elektrons beim Zerfall eines Kobaldekerns zeigt und auch die Spiegelung davon.

Inhalt:

In der Natur kommen links- und rechtsdrehende Substanzen vor. Diese besitzen unterschiedliche Eigenschaften und Verwertbarkeiten. Meistens tritt aber nur eine Variante auf.

Zerfallende Kobaldekerns, die in einem Magnetfeld ausgerichtet wurden, senden das entstandene Elektron immer auf derselben Seite des Atoms aus. Atome, bei denen die Elektronen auf der anderen Seite austreten, gibt es nicht. Bei Antimaterieteilchen wäre dies der Fall.

Mit diesem Experiment kann man links und rechts eindeutig unterscheiden. Dadurch ist es auch möglich Materie von Antimaterie zu unterscheiden, da im Fall von Antimaterie das Positron an der anderen Seite austritt.

Bewertung:

Diese Seite könnte man als Einstieg in die Quantenmechanik verwenden.

Die Problematik, die hier angesprochen wird, könnte von den Schülern gelesen, diskutiert und interpretiert werden.

Der Doppelspaltversuch – Einstieg in die Quantentheorie:

Auf dieser Seite gibt es sieben Grafiken. In fünf werden Interferenzerscheinungen von einzelnen Elektronen dargestellt. In zwei Bildern werden Wasser- bzw. Schallwellen gezeigt.

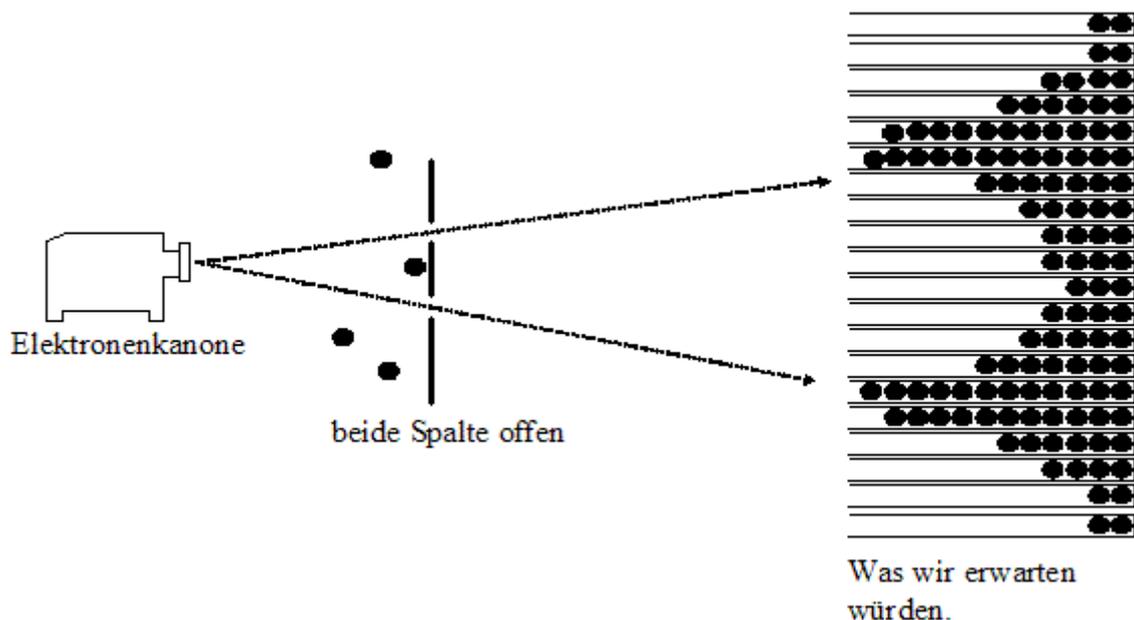
Inhalt:

Elektronen besitzen sowohl Wellen als auch Teilcheneigenschaften.

Mithilfe des Doppelspaltexperiments mit Elektronen kann man dieses Phänomen schrittweise untersuchen. Zuerst beschießt man eine Detektorenfläche mit einer Elektronenkanone. Alle Detektoren werden von etwa gleich vielen Elektronen getroffen. Die Elektronen werden in den Skizzen durch schwarze Kugeln dargestellt. Als nächstes wird eine Doppelblende in den Strahl gestellt, bei der aber jeweils eine Öffnung verdeckt ist. Die meisten Elektronen treffen direkt hinter dem offenen Loch auf.

Was man erwarten würde, wenn beide Spalten offen sind, sieht man anhand eines anderen Bildes.

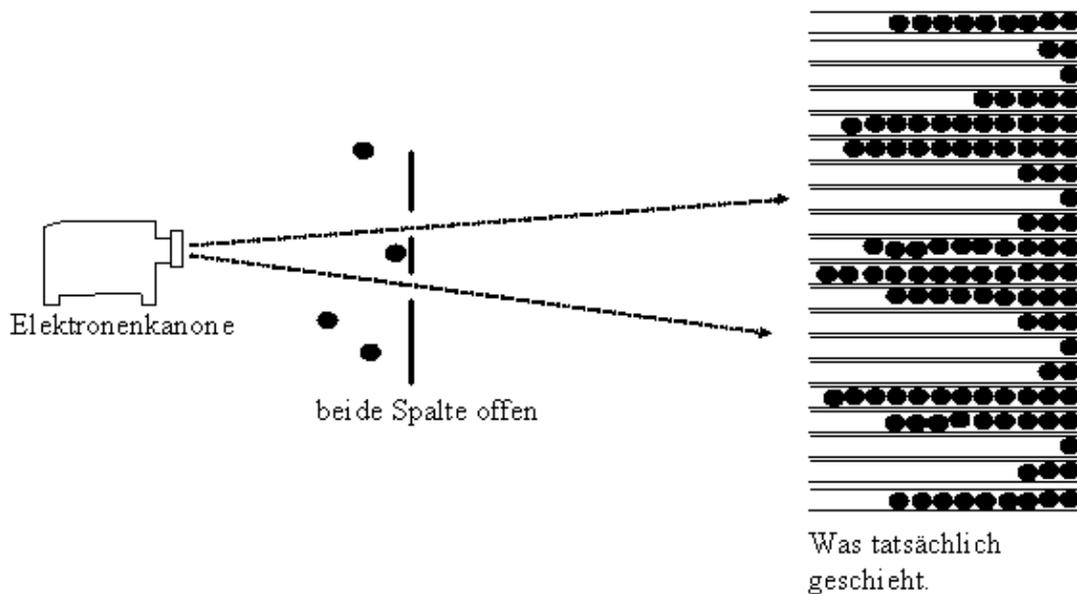
Bild²



² <http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Doppelspalt/doppelspalt.html>

Im nächsten Bild ist das wirkliche Beugungsmuster zu sehen, das bei diesem Experiment entsteht.

Bild: ³



Dieses Phänomen kann mit Hilfe von Wasser- oder Schallwellen nachvollzogen werden, die an einem Doppelspalt gebeugt werden.

Es wird der Welle- Teilchendualismus von Elementarteilchen erklärt. Bei Wasser- oder Schallwellen sind immer mehrere Teilchen beteiligt. Quantenmechanische Teilchen, wie zum Beispiel Elektronen, können aber auch nur mit sich selbst interferieren und sie treten immer nur als ganze Teilchen auf.

Wenn man Interferenzmuster beobachtet, kann man nicht sagen durch welchen Spalt ein Elektron gelaufen ist. Ist aber der Weg bekannt, den Teilchen genommen hat, so entsteht kein Interferenzmuster mehr.

Klassisch könnte das Doppelspaltexperiment mithilfe der Führungswellentheorie erklärt werden. Dabei soll das Elektron auf einer gleichzeitig mit ihm emittierten Welle schwimmen.

³<http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Doppelspalt/doppelspalt.html>

Bewertung:

Dieser Versuch kann im Unterricht mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht vorgeführt werde. Man ist daher auf Abbildungen, wie zum Beispiel auf dieser Internetseite, angewiesen. Die Abbildungen sind sehr gut und auch gut erklärt und könnten im Unterricht als Anschauungsmaterial eingesetzt werden. Die Erklärung sollte aber durch die Lehrkraft erfolgen. Der Hinweis auf dieser Internetseite, dass das Phänomen auch bei Wellen auftritt, sollte aufgegriffen werden. Die Interferenz könnte durch einen Versuch mit einer Wellenwanne vorgeführt werden. Dadurch würde das Verständnis für die Abbildungen des Doppelspaltversuches vertieft.

Die Rolle des Beobachters in der Quantentheorie:

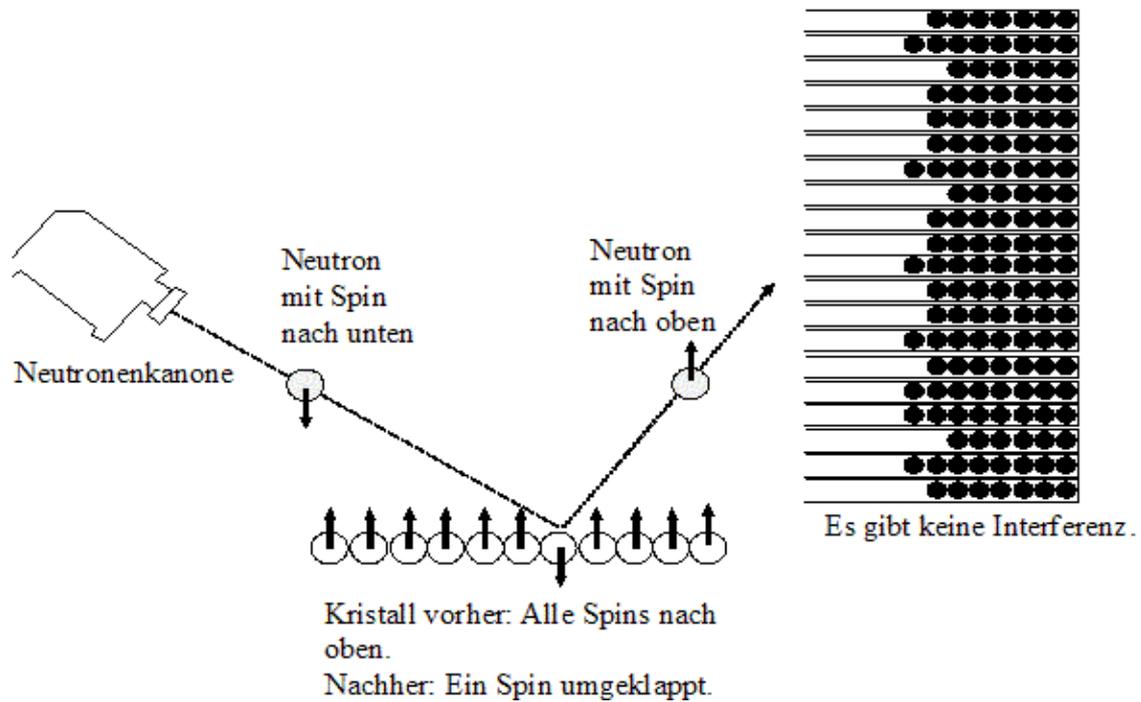
Hier wird anhand zweier Bilder erklärt, dass Interferenz nur dann auftritt, wenn der Weg des Elektrons nicht registriert wurde.

Inhalt:

Anders als in der klassischen Mechanik wird in der Quantenmechanik das System durch einen Beobachter beeinflusst. Man braucht nicht einmal einen bewussten Beobachter, es reicht, wenn das Elektron eine Spur hinterlässt. Dazu wird ein Experiment beschrieben in dem Neutronen an einem Kristall gestreut werden. Auf dem Bild kann man erkennen, dass an den Detektoren ein Interferenzmuster entsteht. Ein Neutron hat mehrere Wege zur Auswahl, die dann miteinander interferieren.

Richtet man die Atome des Gitters nach ihrem Spin aus und stattet die Neutronen mit einem entgegengesetzten Spin aus, dann entsteht ein anderes Muster.

Bild: ⁴



Da das Neutron eine Spur am Gitter hinterlässt, indem es seinen Spin mit dem des Atomkerns austauscht, tritt kein Interferenzmuster auf.

Bewertung:

Von dieser Seite sind beide Abbildungen für den Unterricht brauchbar.

Der Text sollte aber den Schülern von der Lehrkraft in einer verständlichen Form dargebracht werden.

Gibt es leere Quantenwellen?

Im ersten Bild dieses Abschnitts wird die Aufspaltung eines Photons in einem doppelbrechenden Kristall dargestellt. In den anderen Abbildungen werden Doppelspaltexperimente mit doppelbrechenden Kristallen gezeigt.

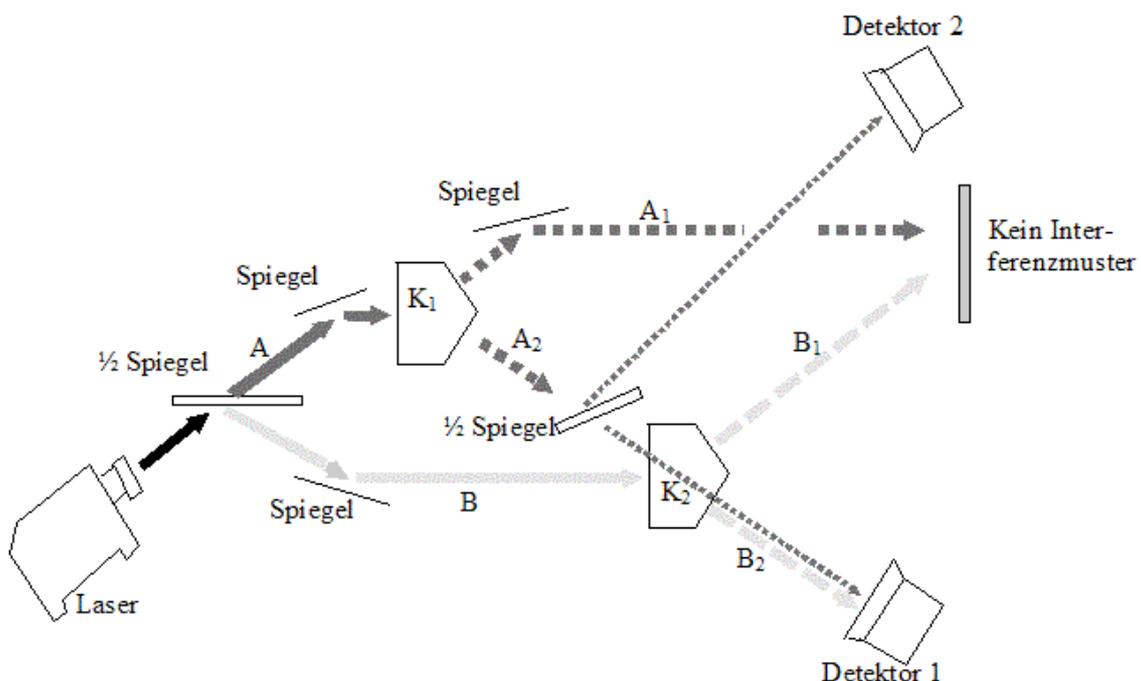
⁴<http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Beobachter/beobachter.html>

Inhalt:

Es wird versucht darzustellen, dass eine Welle nicht ohne Teilchen existieren kann. Bei diesen Versuchen werden Photonen verwendet. Es werden zwei verschiedene Methoden vorgestellt mit denen man Photonen in zwei Strahlen aufteilen kann.

Beim ersten Verfahren wird das Photon durch einen doppelbrechenden Kristall geschickt, dadurch wird es in zwei Photonen mit halber Energie aber doppelter Wellenlänge aufgespaltet.

Bild: ⁵



Beim zweiten Versuch wird ein halbdurchlässiger Spiegel verwendet, um ein Photon eines Lasers aufzuspalten. Das Photon hat die Möglichkeit zwei Wege zu gehen und kann sich daher überlagern oder interferieren.

Es wird ein etwas abgewandelter Doppelspaltversuch beschrieben.

Zuerst wird ein Photon an einem halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilwellen A und B aufgeteilt. A trifft auf einen doppelbrechenden Kristall K_1 und wird dort in das Photonenpaar A_1 und A_2 aufgespaltet. Die beiden Wege existieren aber wieder nur, wenn man sie beobachtet.

⁵http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Leere_Wellen/_leere_wellen_.html

Die Teilwelle B trifft auf einen doppelbrechenden Kristall K_2 , wo es in das Photonenpaar B_1 und B_2 aufgespaltet wird. Das passiert im selben Moment, in dem die Teilwelle A_2 auf den Kristall trifft. Führt man die Teilstrahlen A_1 und B_1 sowie die Strahlen A_2 und B_2 zusammen, kann man nicht mehr sagen, ob das Photon den Weg A oder B genommen hat. Daher kommt es zwischen A_1 und B_2 zu einem Interferenzmuster.

A_2 muss gleichzeitig mit B den Kristall erreichen, da die beiden Teilwellen von B die Phase von A_2 übernehmen. Ohne diese Taktgabe würden die Teilwellen von B zu einem beliebigen Zeitpunkt zu schwingen beginnen und es würde zu keinen Interferenzen kommen. Da sich A_2 und B_2 überlagern, kommt es an dieser Stelle zu keinen schönen Interferenzmustern.

Im nächsten Experiment wird gezeigt, was passiert, wenn man den Strahl A_2 zwischen den beiden Kristallen unterbricht. Jetzt kann man genau sagen, welchen Weg das Photon genommen hat und deshalb verschwindet das Interferenzmuster.

Im folgenden Experiment sieht man, dass für ein Interferenzmuster die Führungswelle alleine nicht genügt.

Die Führungswelle sollte nach der Theorie von de Broglie ausreichen um im Kristall die Phase vorzugeben.

Der Strahl A_2 wird zwischen den beiden Kristallen durch einen halbdurchlässigen Spiegel geschickt. Dadurch wird er entweder zu einem Detektor umgeleitet oder geht durch den Spiegel durch.

Selbst wenn das Photon reflektiert wird, sollte ein Teil der Führungswelle durch den Spiegel gelangen und den Takt im Kristall angeben. Dadurch sollte es dann zwischen A_1 und B_2 zu einer Interferenz kommen.

Es wird ein Photon in die Apparatur geschickt. Misst man beim zweiten Detektor ein Photon, dann kreuzen sich in K_2 zwei leere Wellen und in A_1 muss ein Photon mitschwingen. Zwischen A_1 und der leeren Welle B_2 wird keine Interferenz beobachtet. Das bedeutet, dass eine leere Welle keinen Einfluss auf das Experiment hat.

Dieses Experiment funktioniert auch mit einem 99% durchlässigem Spiegel nicht.

Wenn man den Weg weiß, den das Teilchen gegangen ist, gibt es keine Interferenz.

Bewertung:

Diese Seite kann der Lehrkraft als Zusatzinformation dienen. Meiner Meinung nach übersteigt sie aber die im Lehrplan geforderten Inhalte.

Niels Bohrs Atommodell:

Hier gibt es zwei Grafiken. In der ersten werden verschiedenen Wellenlängen von Gitarrensaiten gezeigt und in der zweiten Grafik wird anhand des Bohrschen Atommodells gezeigt, wie es zur Aussendung von Photonen kommt.

Inhalt:

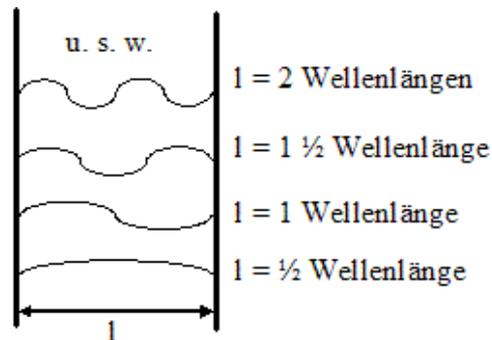
Warum fallen Elektronen nicht in den Atomkern. Eigentlich müssten sie ihre Energie bei der Umkreisung abstrahlen.

Als Lösungsversuch kann man das Problem fast klassisch besprechen.

Begonnen wird mit Rutherfords Goldfolien-Versuchs, mit dem er zeigte, dass das Atom aus einem positiven Atomkern besteht, der von negativ geladenen Elektronen umkreist wird. Dadurch wird aber die Frage aufgeworfen, warum die Elektronen nicht wie in einer Radioantenne ihre Energie abstrahlen und dadurch nach kurzer Zeit in den Atomkern stürzen. Bohrs Hypothese besagt, dass Elektronen nur auf bestimmten Bahnen den Atomkern umkreisen können. Was aber wieder die Frage aufwirft, warum das nur auf diesen Bahnen möglich ist.

Als Antwort darauf kann man Louis deBroglies Doktorarbeit anführen, in der er den wellenartigen Charakter der Elektronen beschrieb. Da im Atomkern die Elektronen nur bestimmte Wellenlängen haben, sind dadurch auch nur ganz bestimmte Energiewerte möglich. Als anschauliches Beispiel wird die Schwingung einer Gitarrensaite verwendet, die mehrere ganzzahlige Wellenberge aufweisen kann. Schwingungen mit einer nicht ganzzahligen Anzahl von Wellenbergen gibt es nicht, da sich diese von selbst auslösen. Zur Veranschaulichung wird eine Grafik mit mehrere Schwingungsmöglichkeiten gezeigt.

Bild: ⁶



Da sich das Elektron in einem abgeschlossen Raum befindet, kann es nur ganz bestimmte Wellenlängen bzw. Energiewerte annehmen. Dadurch hat es auch einen durch die Energie bestimmten Abstand vom Atomkern. Die Bahn des Elektrons muss einem Vielfachen seiner Wellenlänge entsprechen. Die halbe Wellenlänge kann nicht größer als „der Kasten“ sein. Dadurch kann man erklären, wieso es nicht möglich ist, dass das Elektron zur Ruhe kommen und damit in den Kern fallen kann. In diesem Fall müsste die Wellenlänge unendlich werden, was aber nicht möglich ist.

Als nächstes wird die Entstehung von Spektrallinien erklärt. Elektronen können nur Photonen mit bestimmten Wellenlängen bzw. Farben aufnehmen oder abgeben. Anhand dieser Linien können chemische Elemente identifiziert werden. Als Beispiel wird hier Helium verwendet. Helium konnte zum ersten Mal bei Spektraluntersuchungen des Sonnenlichts nachgewiesen werden.

In der nächsten Grafik wird veranschaulicht wie ein Elektron ein Photon einer bestimmten Wellenlänge abgibt, wenn es in eine niedrigere Bahn wechselt, beziehungsweise eines aufnimmt, wenn es in eine höhere Bahn wechselt.

Der Aufenthaltsort der Elektronen sind nicht Bahnen um den Atomkern, sondern sie halten sich in den Orbitalen auf. Außerdem kann die genaue Position wegen der Unbestimmtheitsrelation nicht gemessen werden.

Nach dem Pauliprinzip dürfen in jedem Orbital nur zwei Elektronen sein, die sich im Spin unterscheiden.

⁶http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Niels_Bohrs_Atom/niels_bohrs_atom.html

Bewertung:

Niels Bohrs Atommodell und warum die Quantentheorie eingeführt wurde, wird in manchen Lehrbüchern besser dargestellt. Der Autor gibt hier sogar das Lehrbuch von Sexl/Raab/Sterrowitz an. Die neueste Auflage dieses Lehrbuchs bringt einen besseren Überblick zu dieser Thematik.

Schrödingers Katze:

Als Bildmaterial sieht man die Überlagerung zweier Wellen mit unterschiedlicher Frequenz, was zu Schwebungen führt.

Inhalt:

Es wird mit einem Ausspruch Schrödingers begonnen, mit der er zeigen wollte, wie absurd die Aussagen der Quantentheorie sind. Im Versuch mit „Schrödingers Katze“ wird eine Katze in einem Behälter mit einer giftigen Substanz gesperrt. Durch den Zerfall eines Atoms wird das Gift freigesetzt. Erst nach dem Öffnen des Kastens kann man sagen, ob die Katze tot ist oder noch lebt. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Katze sowohl lebendig als auch tot. Dieses Phänomen kann man auch am Doppelspaltexperiment erklären. Auch bei diesem Experiment wird erst durch die Beobachtung entschieden, welchen Weg das Photon genommen hat. Gibt es keinen Beobachter nimmt das Photon beide Wege und wird auch von beiden Wegen beeinflusst.

Auch ein unbeobachtetes Atom kann entweder zerfallen oder nicht zerfallen sein und daher müssen beide Zustände bei einer Vorhersage berücksichtigt werden. An Beispielen aus der Quantenmechanik werden diese Phänomene dargestellt: wie gleichzeitiges Vor- und Zurückschwingen eines Atoms in einem Gitter, gleichzeitiges Links- und Rechts herumfließen eines Kreisstromes oder Teilchen, die sich zugleich an verschiedenen Orten befinden. Man kann nie beide Zustände zugleich beobachten. Sobald ein Beobachter das Experiment betrachtet „entscheiden“ sich die Teilchen für einen Zustand. Sie beinhalten aber noch immer Informationen von allen anderen möglichen Zuständen.

Das nächste Experiment soll dieses Phänomen erklären.

Nach dem Bohrschen Atommodell kann sich ein Elektron nur in einem Orbital aufhalten. In Wirklichkeit kann ein Elektron in mehreren Orbitalen sein, was bedeutet, dass es unterschiedliche Energiewerte haben kann.

Ein Gas aus Atomen wird mit niederenergetischen Photonen beschossen, die ausreichen, um die Elektronen aus dem Grundzustand in die nächsthöhere Ebene zu heben. Kurz darauf kehren die Elektronen wieder in ihren Grundzustand zurück und emittieren dabei Photonen gleicher Energie. Die Strahlung nimmt logarithmisch ab. Wird dieselbe Gassorte mit energiereicheren Photonen beschossen, erhält man dasselbe Ergebnis. Danach vermischt man die beiden Gase, dann ist die eine Hälfte der abgegebenen Photonen energiereicher.

Beschießt man das Gas gleichzeitig mit Photonen unterschiedlicher Energiezustände, kann man nicht mehr sagen von welchem Photon das Atom angeregt wurde. In diesem Fall wird das Licht nicht gleichmäßig, sondern pulsierend abgestrahlt.

Dieses Phänomen wird durch das Wellenmodell erklärt. Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen, die einander überlagern, rufen Schwebungen hervor. Das wird anhand der Akustik erläutert.

Jedes Atom kann beide Energiezustände haben. Betrachtet man einzelne Atome, kann man sehr wohl feststellen, in welchen Anregungszustand sie sich befinden. Dadurch verschwindet aber wie beim Doppelspaltexperiment die Überlagerung.

Im nächsten Abschnitt werden noch zwei Fragen gestellt:

1. Wie groß darf die Katze sein, damit sie noch als Überlagerung von Wellen beschrieben werden kann. Im Alltag können Überlagerungen oder Interferenzen nicht beobachtet werden, obwohl sie bei den Elementarteilchen ständig beobachtbar sind. Dies erklärt man damit, dass die Periode der Schwebung umso größer wird, je näher die Energien beisammenliegen. Da bei makroskopischen Zuständen die Energieunterschiede sehr schnell sehr groß werden, sind Schwebungen nicht mehr beobachtbar.

2. Was passiert mit der leeren Welle, wenn man in der Welle ein Teilchen findet? Breitet sich die Welle weiterhin unbeobachtbar durchs Universum aus oder kollabieren die Wellenteile, die Lichtjahre auseinanderliegen können, in dem Moment, in dem man das Teilchen findet.

Bewertung:

Das Gedankenexperiment „Schrödingers Katze“ sollte auf jeden Fall im Unterricht besprochen werden. Meiner Meinung nach ist der erste Teil dieser Seite für den Unterricht geeignet, der zweite aber nicht. Hier wird zuviel Theorie gebracht.

Der Quanten-Zenon Effekt:

Die einzige Abbildung in diesem Abschnitt stellt das Bohrsches Atommodell mit drei Bahnen und den Energieniveaus dar.

Inhalt:

Man betrachtet ein Atom mit einem Elektron, das sich in drei verschiedenen Aggregatzuständen befinden kann. Es wird eine Möglichkeit gezeigt, wie man feststellen kann, ob das Atom angeregt ist oder nicht. Das Atom kann sich entweder im Grundzustand, in einem energetisch etwas höheren relativ stabilen Energiezustand oder in einem energiereichen aber nicht sehr stabilen Zustand befinden. Sobald das Elektron in den Grundzustand zurückfällt, sendet das Atom Photonen mit unterschiedlichen Wellenlängen aus. Diese Abstrahlung der Energie wird Fluoreszenz genannt. Es wird vorausgesetzt, dass das Elektron nicht vom dritten in den zweiten oder vom zweiten in den dritten Zustand wechseln kann. So etwas kommt öfter vor, da es zum Beispiel nicht möglich ist, dass ein Photon abgestrahlt wird, wenn die beiden Bahnen dieselbe Spinzahl haben.

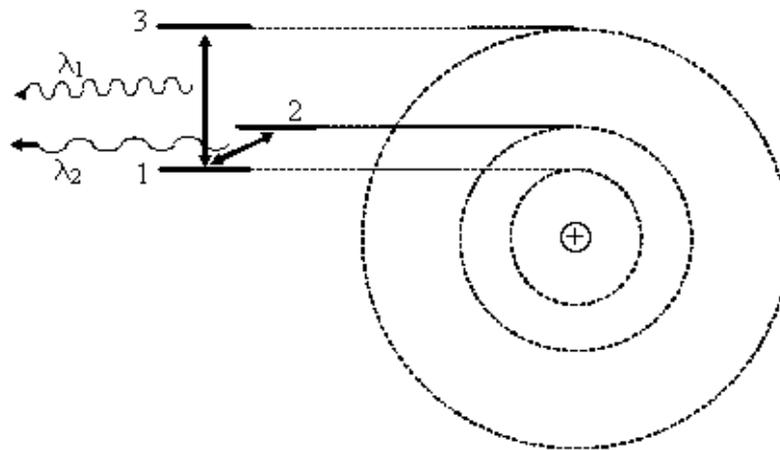
Fluoreszenz kann dadurch angeregt werden, dass man das Elektron mit einem Laser beschießt. Kurz darauf fällt das Elektron in den Grundzustand zurück und gibt dabei das zugeführte Licht wieder in eine beliebige Richtung ab. Ein Elektron, das sich im zweiten Anregungszustand befindet, kann diese Wellenlänge nicht aufnehmen. Deshalb fluoresziert

das Atom nicht und man kann dadurch feststellen, in welchem Zustand sich das Atom befindet.

Übergänge von 1 nach 3 gehen wesentlich schneller als Übergänge von 1 nach 2.

Das Bild zeigt das Atom mit den drei möglichen Energiezuständen und die Übergänge.

Bild: ⁷



Das Elektron befindet sich nicht immer genau auf einer Bahn, sondern erst wenn man nachsieht. Lässt man das Elektron auf der dritten Bahn zurück und beobachtet es nicht, dann gibt es nach einer Weile drei Wahrscheinlichkeiten: Das Elektron befindet sich noch auf der dritten Bahn, es ist schon wieder in den Grundzustand zurückgefallen oder es ist schon in den ersten Anregungszustand übergewechselt. Jede dieser drei Wahrscheinlichkeiten muss berücksichtigt werden.

Ein Elektron, das mit der entsprechenden Wellenlänge beschossen wird, geht nicht sofort in den ersten Anregungszustand über, sondern verschiebt langsam seine Wahrscheinlichkeitswelle bis es sich fast sicher im zweiten Zustand befindet.

Man kann den Aufenthaltsort des Elektrons bestimmen, indem man es mit Licht jener Wellenlänge beschießt, mit der es in den dritten Energiezustand versetzt wird. Fluoresziert

⁷http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Quanten-Zenon_Effekt/quanten-zenon_effekt.html

das Atom nicht, befindet es sich im ersten Anregungszustand. Solange es fluoresziert befindet es sich im zweiten Zustand. Ein Elektron, das beobachtet wird, kann nie in den ersten Anregungszustand gelangen. Wenn es beobachtet wird, verschiebt sich die Wahrscheinlichkeitswelle immer wieder in den Grundzustand. Das Elektron kann den Übergang nur dann machen, wenn es nicht beobachtet wird und sich seine Aufenthaltswelle langsam über die beiden Bahnen verschmieren kann.

Den Abschluss bildet ein Zitat des griechische Philosoph Zenon von Elea: „Zu jedem Zeitpunkt, an dem wir einen fliegenden Pfeil anschauen, ist der Pfeil an einem bestimmten Ort. Der Pfeil ist also immer an einem ganz genau bestimmten Ort. Also ruht der Pfeil.“

Im Andenken an Zenon nennt man das Phänomen, dass sich gewisse Dinge nicht bewegen können, wenn man sie beobachtet, den Quanten-Zenon Effekt.

Bewertung:

Diese Seite beschreibt den Quanten-Zenon Effekt zwar recht gut, würde aber den Lehrplanrahmen sprengen.

Für die Vertiefung im Wahlpflichtfach Physik wäre sie gut geeignet.

Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen drehen:

Hier sind sechs Bilder abgebildet: Im ersten werden Spielkarten gezeigt, mit denen Drehungen dargestellt werden. Die folgende Abbildung erklärt die Spinrichtung durch die Rechte-Hand-Regel. In den nächsten Bildern werden Neutronen durch Polarisatoren und Magnetfelder geschickt. Auf einem Bild wird die Addition von Wellen gezeigt. Im letzten Bild läuft eine Ameise auf einem Möbiusband.

Inhalt:

Dreht man Dinge, dann sind sie spätestens nach einer Drehung um 360° wieder gleich. Auf Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ trifft das nicht zu, sie sind erst nach einer Drehung um 720° wieder gleich. Anhand von Spielkarten werden verschiedenen Drehungen veranschaulicht.

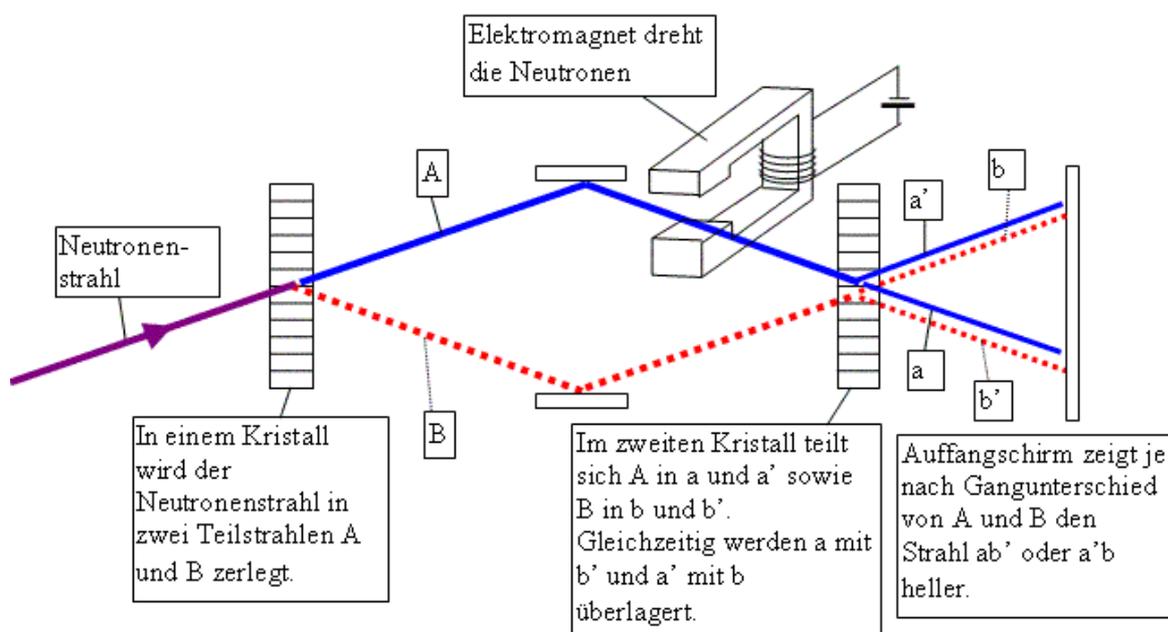
Bei diesem Experiment wird ein Neutron mit Spin $\frac{1}{2}$ gedreht. Ein Neutron besteht aus drei geladenen Quarks und besitzt deshalb ein magnetisches Moment. Außerdem haben Neutronen einen Spin und drehen sich um sich selbst. Die Spinrichtung kann mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel bestimmt werden. Das wird anhand einer Zeichnung noch mal verdeutlicht.

Durch einen Polarisator erzeugt man einen Strahl von Neutronen, die alle dieselbe Spinrichtung haben. Schickt man diesen Strahl durch ein homogenes Magnetfeld, beginnen die Neutronen zu präzedieren. Je länger sich die Neutronen im Magnetfeld befinden und je stärker das Feld ist desto mehr Neutronen ändern ihren Spin. Nachweisen kann man das mit einem zweiten Polarisator. Nach einiger Zeit haben alle ihren Spin umgedreht. Lässt man sie noch länger im Magnetfeld, wechseln sie wieder zu ihrem ursprünglichen Spin. Diesen Effekt kann man auch bei Myonen beobachten.

Um die Drehung um 360 Grad nachzuweisen, wird ein weiterer Versuch durchgeführt.

Elementarteilchen bewegen sich wellenartig fort. Bei einer Drehung um 360° verschiebt sich die Phase der Wahrscheinlichkeitswelle.

Bild: ⁸



⁸ http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Spin_1_2_Teilchen_drehen/spin_1_2_teilchen_drehen.html

Die Welle eines einzelnen Neutrons wird in einem Strahlteiler geteilt, wieder zusammengeführt und erneut durch einen Strahlteiler geschickt. Die Wege werden so eingestellt, dass sich zwei Strahlen auslöschen und die andern beiden maximal werden. Um die Verschiebung der Welle zu zeigen, wird an einen der beiden Hauptstrahlen ein Magnetfeld angelegt. Dadurch ändern sich je nach Gangunterschied die Intensitäten der beiden Überlagerungen.

Die Interferenzmuster sehen anders aus, wenn die Neutronen um 360° oder um 720° bzw. gar nicht gedreht wurden.

Im letzten Abschnitt werden noch drei Beispiele aus dem Alltag vorgestellt, die das Experiment zu veranschaulichen versuchen: eine Ameise auf einem Möbiusband, Drehen einer Kaffeekanne mit einer Hand um die eigene Achse oder das Nachhinken des Innern in einem weichen Ei.

Bewertung:

Eine sehr anspruchsvolle Seite, die man mit besonders interessierten Schülern auswerten kann. Das Wahlpflichtfach würde sich dafür eignen.

Das Einstein-Podolsky-Rosen Experiment:

Auf dieser Seite sind vier Abbildungen. Im ersten Bild ist ein Quecksilberatom abgebildet, das zwei verschränkte Photonen aussendet. Das zweite Bild zeigt das Einstein-Podolsky-Rosen Experiment. In den nächsten beiden Bildern werden die „Pläne“ der Photonen erläutert.

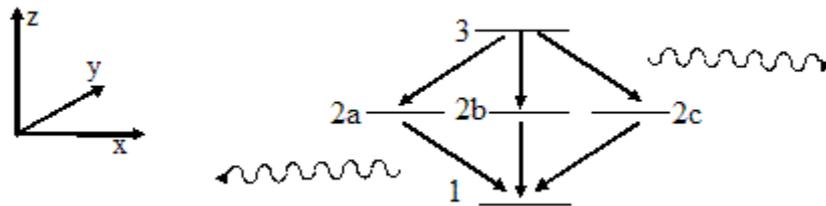
Inhalt:

Zwei Teilchen können über weite Distanzen miteinander kommunizieren, die Messung eines Teilchens kann das andere beeinflussen.

Um dies zu zeigen wird folgendes Experiment besprochen: Es wird ein Atom verwendet, das drei Elektronenbahnen besitzt, wobei in der mittleren Bahn drei verschiedene Zustände für Elektronen möglich sind, die sich nur in der magnetischen Quantenzahl unterscheiden.

Ein Elektron kann nicht von der dritten in die erste Ebene springen, sondern muss einen Umweg über die zweite Ebene machen, wobei es jeweils ein Photon aussendet. Diese beiden Photonen sind verschränkt, sie fliegen in entgegengesetzte Richtungen auseinander und sind in dieselbe Richtung polarisiert.

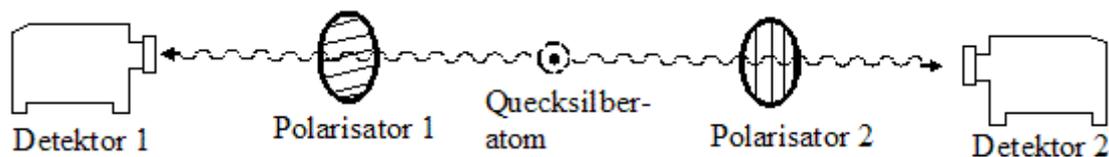
Bild: ⁹



Das Elektron ist nicht nur einen Weg gegangen, sondern alle Wege und die ausgesandten Photonen besitzen daher beide Polarisationszustände. Es wird erst durch die Messung entschieden, wie ein Photon polarisiert ist.

Im Einstein-Podolsky-Rosen Experiment wird ein Quecksilberatom verwendet. Die beiden ausgesandten Photonen werden durch jeweils einen drehbaren Polarisator geschickt und danach wird an einem Detektor gemessen, wie oft ein Photon registriert wird. Dadurch sollte bewiesen werden, dass die Zustände der Photonen voneinander abhängig sind.

Bild: ¹⁰



Sind die Polarisatoren gleich ausgerichtet dann fliegen entweder beide Photonen durch oder es werden beide absorbiert. Stehen sie normal zueinander, kann ein Photon den Filter

⁹ http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Einstein_Podolsky_Rosen/einstein_podolsky_rosen.html

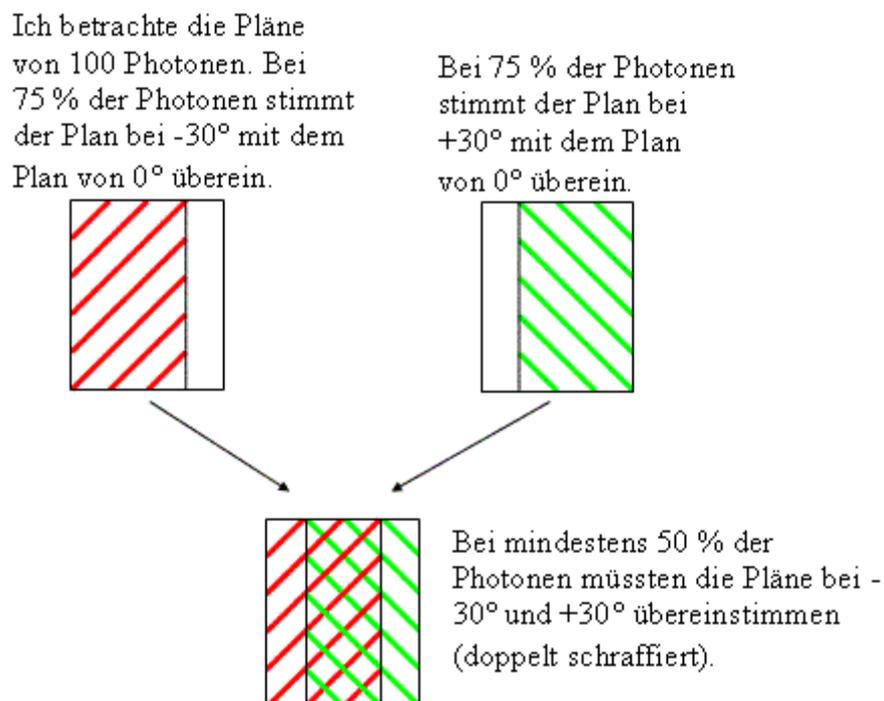
¹⁰ http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Einstein_Podolsky_Rosen/einstein_podolsky_rosen.html

passieren und das andere wird absorbiert. Es wird die Theorie aufgestellt, dass sich die Photonen von Anfang an „abgesprochen“ haben, bei welchen Einstellungen sie durch die Polarisatoren gehen und bei welchen nicht.

Folgende drei Bedingungen müssen erfüllt sein, damit eine „Absprache“ funktionieren könnte: Die Photonen müssen für jede Polarisatoreinstellung wissen, was sie zu tun haben. Die Pläne für die Photonen müssen gleich sein. Durch den Plan sollen die Photonen in der Hälfte der möglichen Einstellungen durchkommen, in der anderen blockiert werden.

Sind die Polarisatoren um einen beliebigen Winkel α zueinander verstellt, dann verhalten sich die Photonen in $|\cos \alpha|^2$ der Fälle gleich.

Bild: ¹¹



Tatsächlich trifft dies bei einem 60° Unterschied aber nur für 25% zu.

Es gibt keine Möglichkeit das Verhalten im voraus „abzusprechen“, denn die Photonen müssten den Zwischenwinkel zwischen den Polarisatoren kennen. Das heißt, die Photonen müssten während der Messung mit Überlichtgeschwindigkeit miteinander kommunizieren.

Laut der Relativitätstheorie müsste es möglich sein, Nachrichten in die Vergangenheit zu schicken beziehungsweise aus der Zukunft zu erhalten. Es ist aber trotzdem nicht möglich mit

¹¹http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Einstein_Podolsky_Rosen/einstein_podolsky_rosen.html

verschränkten Teilchen Botschaften zu verschicken, da man den Informationsaustausch nur dadurch beobachten kann, dass man die Ergebnisse vergleicht.

John Bell hat mathematisch bewiesen, dass eine lokale Erklärung nicht möglich ist.

Bewertung:

Im Lehrbuch Sexl ist dieses Experiment für den Schulgebrauch gut beschrieben. Diese Internetseite könnte interessierten Schülern zum Selbststudium dienen.

Komplementäre Größen:

Auf dieser Seite gibt es fünf Bilder. Es wird darin erklärt, wie Protonen in einem inhomogenen Magnetfeld ihrem Spin nach aufgeteilt werden.

Die Skizzen sind sehr anschaulich, da für das Proton ein kleiner Stabmagnet eingezeichnet ist.

Inhalt:

Am Anfang wird die These aufgestellt, dass Teilchen nur die Eigenschaften besitzen, die man beobachtet.

Für das folgende Experiment werden Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen verwendet. In einem inhomogenen Magnetfeld wird ein Teil nach oben und der andere Teil nach unten abgelenkt. Man kann den Vergleich mit kleinen Stabmagneten anstellen. Hier werden Protonen verwendet, aber ebenso kann man den Versuch mit Neutronen oder Elektronen durchführen.

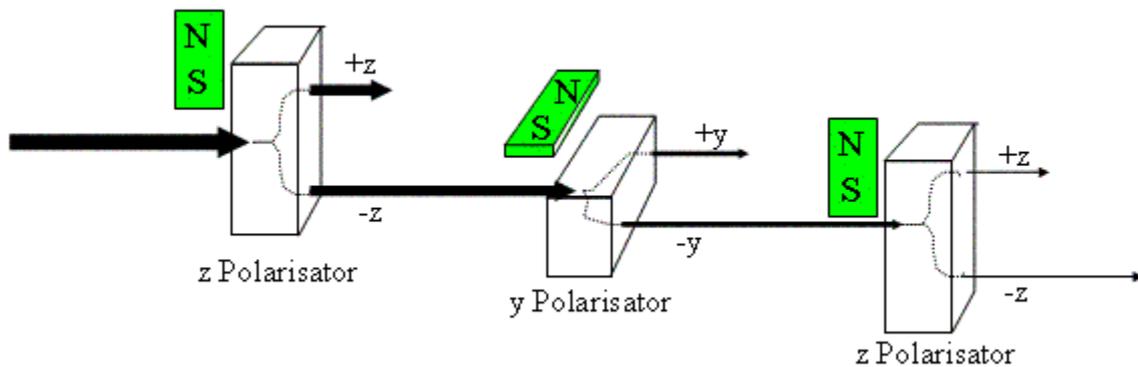
Für ein Proton im Magnetfeld gelten folgende Regeln: gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen einander an. Außerdem kann das Proton nur parallel oder antiparallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet sein.

Beim Proton werden ein positiver und ein negativer Spin definiert. Der Spin hängt nur vom äußeren Magnetfeld ab.

Mit dem Stern-Gerlach Versuch kann man zeigen, dass es im Magnetfeld nur zwei Sorten von Protonen gibt und man sie nach dem Spin sortieren kann.

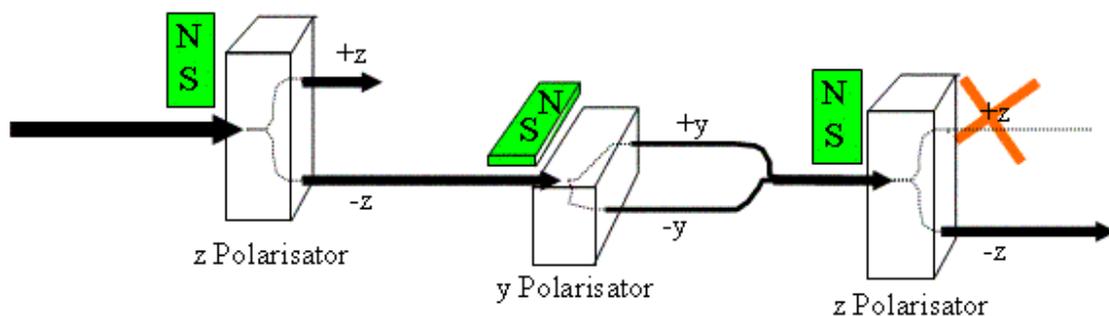
Im nächsten Versuch werden drei Magnetfelder angelegt, die die Protonen zuerst in $+z$ und $-z$ aufspalten, danach werden die $-z$ in $+y$ und $-y$ zerlegt und danach die $-y$ wieder durch einen z -Polarisator geschickt. Dabei bemerkt man, dass einige Protonen wieder $+z$ Spin aufweisen.

Bild: ¹²



Werden die Protonenstrahlen, nachdem sie durch den y -Polarisator geteilt wurden, wieder vereinigt und danach wieder durch einen z -Polarisator geschickt, dann treten keine Protonen mit einem $+z$ Spin auf.

Bild: ¹³



Daraus kann man schließen, dass im $-y$ Strahl $+z$ Protonen und im $+y$ Strahl $-z$ Protonen vorhanden sind, nicht aber in beiden Strahlen zusammen.

¹² http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Komplementaere_Groessen/komplementaere_groessen.html

¹³ http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Komplementaere_Groessen/komplementaere_groessen.html

In der Quantenphysik gibt es viele Beispiele für solche Phänomene. Die Messgrößen solcher Paare werden komplementär genannt und können nicht gleichzeitig exakt gemessen werden. Solche Paare können auch über die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation zusammenhängen, wie zum Beispiel Ort und Impuls eines Teilchens.

Dem Proton dürfen keine Eigenschaften zugeschrieben werden, die man nicht gemessen hat. Teilchen können nicht nur an zwei Orten gleichzeitig sein, sondern der Experimentator kann auch im Nachhinein entscheiden, ob das Teilchen an beiden Orten oder nur an einem war.

Am Ende wird noch die Kopenhagener Deutung erwähnt, nach der ein Teilchen nur dann an einem bestimmten Ort ist, wenn es dort gemessen wird.

Bewertung:

Der Inhalt dieser Seite geht über den Lehrplan hinaus und sollte im Unterricht nicht verwendet werden.

Resonanzphänomene:

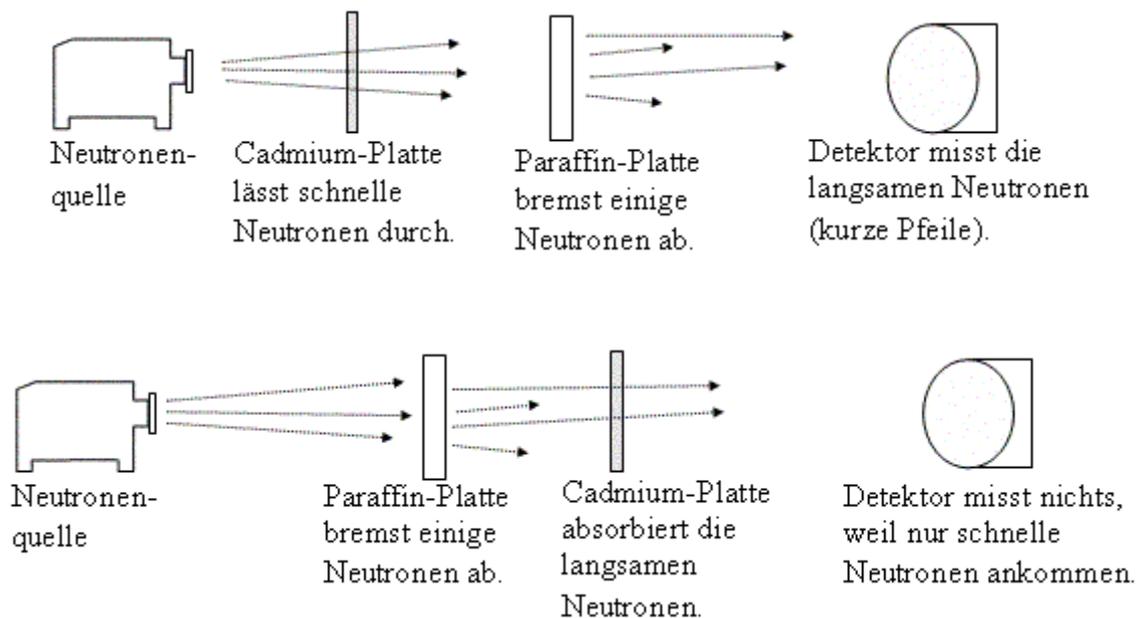
In diesem Abschnitt gibt es eine Abbildung, in der gezeigt wird, wie Neutronen durch verschiedene Substanzen verlangsamt und absorbiert werden.

Inhalt:

Neutronen müssen in Atomreaktoren abgebremst werden, damit es zu Reaktionen kommt. Als Grund für diesen Effekt wird Resonanz angeführt.

Anders als im Alltag können langsamere Teilchen mehr ausrichten als schnelle. Zum Beispiel lässt Bor schnelle Neutronen durch, wenn es aber von langsamen Neutronen getroffen wird spaltet es α -Teilchen ab. Auch Cadmium lässt schnelle Neutronen passieren, langsame aber absorbiert es.

Bild: ¹⁴



In Kernkraftwerken werden die Neutronen durch Wasser oder Graphit abgebremst, da sie sonst nicht vom U_{235} sondern vom U_{238} absorbiert werden.

Das Phänomen, dass langsamere Neutronen mehr ausrichten können als schnelle, wird mit Hilfe der Akustik erklärt. Eine Stimmgabel schwingt nur bei gewissen Tönen mit, bei höheren Tönen passiert nichts.

Bewertung:

Diese Seite ist in anderen Bereichen wie Akustik, Kernspaltung und Spektroskopie einsetzbar.

Antimaterie:

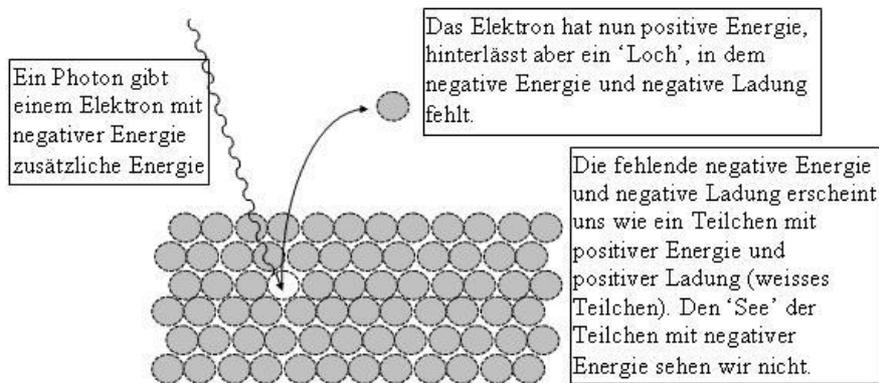
In einer Abbildung wird dargestellt, wie ein Elektron aus dem Diracsee gefischt wird. Durch eine andere Skizze wird veranschaulicht, wie durch ein Photon ein Teilchen- Antiteilchen-Paar entsteht und wie daraus wieder ein Photon wird.

¹⁴<http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Resonanzphanomene/resonanzphanomene.html>

Inhalt:

Theoretisch wurde nicht die Formel $E = mc^2$ gefunden, sondern $E^2 = m^2c^4$. Die negative Lösung wurde verworfen, da negative Energie absurd erschien. Erst Paul Dirac behauptete, dass es auch Teilchen mit negativer Energie und dass es in einem leeren Raum einen ganzen „See“ von negativ geladenen Teilchen geben müsse. Dieser wird nach ihm Diracsee genannt.

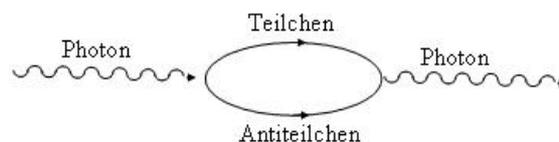
Bild: ¹⁵



Führt man einem Elektron mit negativer Ladung Energie durch ein Photon zu, wird es zu einem normalen Elektron, das beobachtet werden kann. Dadurch fehlen aber im See die negative Energie und die negative Ladung des Elektrons und man sieht das Loch als positiv geladenes Elektron mit positiver Energie, ein Positron.

Fällt das Elektron wieder in das Loch zurück, wird das Photon wieder freigesetzt. Das wird anhand eines Feynman-Diagramms veranschaulicht.

Bild: ¹⁶



¹⁵ <http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Antimaterie/antimaterie.html>

¹⁶ <http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/Antimaterie/antimaterie.html>

In Elementarbeschleunigern werden verschiedene Elementarteilchen durch Kollisionen erzeugt, die teilweise größer als die Ursprungsteilchen sind.

Es ist bewiesen, dass es zu jedem Teilchen auch ein Antiteilchen gibt. Bei manchen Teilchen, wie zum Beispiel Photonen, ist das Teilchen gleich dem Antiteilchen. Diese Teilchen verhalten sich genau so wie ihre Gegenstücke. Später konnte Diracs Theorie so umformuliert werden, dass der See nicht mehr benötigt wird.

Manche ungeladene Antiteilchen verwandeln sich in seltenen Fällen in Teilchen. Der umgekehrte Prozess tritt auch auf, aber noch seltener. Bei diesem Vorgang lässt sich im Mikroskopischen eine Zeitrichtung sichtbar machen.

Es wird auch noch der Vergleich mit einem Tintentropfen im Wasser gebracht.

Bewertung:

Diese Internetseite könnte der Ausgangspunkt für die Besprechung der Antimaterie sein.

milq
Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in
Quantenmechanik

<http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/>

Aufbau:

Auf der Startseite sind alle 13 Unterkapiteln verlinkt. Die einzelnen Kapitel sind nochmals in mehrere Abschnitte unterteilt. Man kommt auch auf eine Seite, von der man die vorgestellten Programme und pdf Dateien, die als Lehrtext konzipiert sind, herunterladen kann.

Auf den einzelnen Seiten sind dann nochmals Links zu den pdf Dateien und den Programmen angegeben.

Es gibt zu manchen Kapiteln Animationen und Programme, die man entweder herunterladen kann oder die direkt in die Seite integriert sind. Diese Programme machen den Stoff leichter verständlich.

Ab dem neunten Kapitel gibt es eine Änderung in der Formatierung und sie stimmt nicht mehr ganz mit den pdf Dokumenten überein. Im 13. Kapitel sind die Unterseiten nur noch mit 1., 2. und 3. nummeriert. In der Zusammenfassung gibt es einen kleinen Fehler: die Überschrift der Zusammenfassung aus Kapitel acht wurde kopiert.

Design:

Diese Seite ist farbenfroh gestaltet und wird durch mehrere Bilder und Diagramme aufgelockert.

Voraussetzungen:

Die Kapitel sind aufbauend strukturiert, was es leichter macht, die einzelnen Bereiche zu verstehen. Die Seite ist eigentlich für Lehrer gedacht, die sich den Stoff vorbereiten wollen um ihn dann der Klasse vorzutragen. Es werde auch einige Vorschläge gemacht, wie man den Stoff bringen könnte und dazu werden auch Vorschläge für Arbeitsblätter angefügt.

Links:

Auf dieser Seite gibt es nur wenige Literaturangaben oder Links zu anderen Seiten. Innerhalb der einzelnen Kapitel kann auf jeder Seite zwischen den einzelnen Unterkapiteln mittels Links gewechselt werden.

1. Photonen

Übersicht:

Am Anfang wird eine Übersicht über die Unterseiten dieses Kapitels angeführt und es wird ein Link zu einem Lehrtext im pdf-Format angegeben.

Der Photoeffekt:

Dieser Abschnitt der milq-Seiten ist für Schüler ohne eine vorherige Besprechung weniger geeignet, da er keinerlei Erklärungen liefert und nur eine kurze Zusammenfassung des Lehrtextes darstellt.

Es ist auch ein Link angeführt in dem erklärt wird, was gegen die Erklärung des Photoeffekts mithilfe der Wellentheorie spricht.

Inhalt:

Ein Experiment (Hallwachseffekt) zur Beschreibung des Photoeffektes wird vorgestellt. Es wird hier nur erwähnt, dass Elektronen durch Photonen aus einer Zinkplatte gelöst werden können und dass die Wellentheorie dieses Phänomen nicht erklären kann.

Einsteinsche Gleichung zum Photoeffekt:

In diesem Kapitel gibt es einen Link zu zwei Arbeitsblättern.

Inhalt:

Licht wird nicht in räumlich kontinuierlicher Energie ausgesandt, sondern in einzelnen Energiepaketen. Die Energiebilanz beim Photoeffekt lautet $hf = E_{\text{Kin}} + W_A + W_S$. Daraus lässt sich die Einstein-Gleichung $E_{\text{Kin,max}} = hf - W_A$ herleiten.

Beim Photoeffekt wird die Energie der Photonen von den Elektronen absorbiert und damit können die Elektronen das Metall verlassen.

Experimente:

Die beiden Bilder auf der Seite zeigen den Versuchsaufbau einer Photozelle zum Nachweis des Photostroms bzw. einen Graphen der die Gegenspannung für verschiedene Frequenzen anzeigt.

Es sind zwei Links zu den Themen Austrittsarbeit und Möglichkeiten zur Bestimmung von h angeführt.

Inhalt:

Das Plancksche Wirkungsquantum $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$ Js kann aus der Steigung des Graphen ermittelt werden.

Impuls der Photonen:

Inhalt:

Der Photoeffekt spricht für die Teilchentheorie des Lichts. Der Impuls des Photons $p = \frac{hf}{c}$

kann auf andere Teilchen übertragen werden, wie zum Beispiel beim Comptoneffekt.

Anhand eines Bildes wird die Frage gestellt, ob es möglich ist, das Teilchen- und das Wellenmodell zu vereinigen.

Es wird auch noch erwähnt, dass die Quantenmechanik ein mathematisches Modell bereitstellt, welches aber nicht besonders anschaulich ist.

Bewertung:

Die pdf-Datei ist sehr gut aufgebaut, ist aber auf Grund des Umfangs eher für die Lehrkraft bestimmt. Für den Unterricht sind die offenen Seiten brauchbar, da man hier nur jene Unterseiten mit den Schülern bearbeiten kann, die dem Wissensstand der Schüler und dem Lehrplan entsprechen.

2. Präparation

Über diese Lektion:

In der Quantenphysik hat das Präparieren von Eigenschaften eine große Bedeutung. Die Präparation spielt auch in der klassischen Physik eine wichtige, wenn auch unbeachtete Rolle.

Präparation in der klassischen Physik:

Eine Abbildung zeigt ein präpariertes System zur Bestimmung der Bahnkurve beim horizontalen Wurf. Zusätzlich sind auf dieser Seite noch zwei Programme zu finden mit denen der User selbst das System präparieren kann. Bei einem Programm kann die Einstellung nur freihändig durchgeführt werden, beim zweiten kann die Auslenkung in 5% Schritten verändert werden.

Anhand von drei Bildern wird der Newtonsche Prismenversuch besprochen.

Es ist auch noch ein Link angeführt, auf dem beschrieben wird, warum die Präparation in der klassischen Physik so wenig beachtet wird. In einem anderen Link wird noch einmal erklärt, dass es nötig ist, die Präparation zu überprüfen.

Inhalt:

Soll das Verhalten physikalischer Objekte untersucht werden, so müssen kontrollierte Anfangsbedingungen hergestellt werden. Das System muss also präpariert werden. Dies wird

anhand des horizontalen Wurfes beschrieben. Es gibt dynamische (veränderliche) und statische (nicht veränderliche) Eigenschaften wie Ladung und Ruhemasse eines Elektrons. Anhand des Newtonschen Prismenversuchs wird gezeigt, dass man Licht nach der Eigenschaft Farbe bzw. Wellenlänge präparieren kann. Dazu wird der aufgefächerte Strahl durch eine Blende geschickt, die nur eine Farbe durchlässt. Wird diese Farbe dann wieder durch ein Prisma geleitet, so wird der Lichtstrahl wieder um denselben Winkel wie zuvor abgelenkt. Das zweite Prisma dient als Test dafür, dass wirklich eine Präparation stattgefunden hat. Es wird darauf hingewiesen, dass es in der Quantenmechanik wichtig ist dies genau zu beachten. Es kann nämlich zu Widersprüchen kommen, wenn man Quantenobjekten ohne Präparation eine Eigenschaft zuweist.

Nicht immer wird eine Eigenschaft präpariert:

Das Bild zeigt eine Lichtquelle und einen halbdurchlässigen Spiegel der als Strahlteiler fungiert.

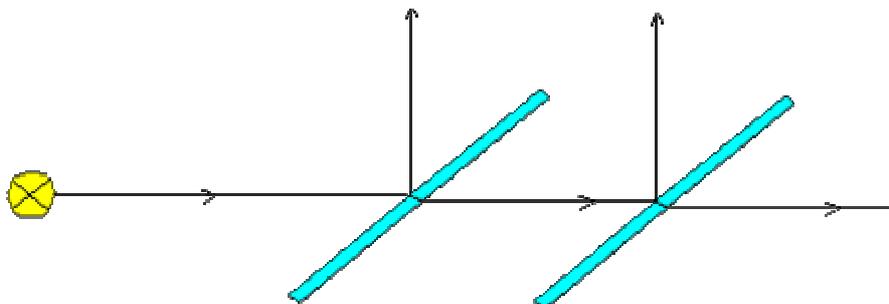
In einem zweiten Bild wird der Strahl durch zwei Strahlteiler geschickt.

Inhalt:

Wird Licht durch einen Strahlteiler geschickt, so wird es in zwei Strahlen mit gleicher Intensität aufgespalten.

Um zu überprüfen, ob der durchgelassene Strahl die Eigenschaft „wird durchgelassen“ besitzt, wird hinter den ersten Strahlteiler ein zweiter gestellt. Da der Strahl aber wieder aufgespalten wird, gibt es diese Präparation nicht.

Bild: ¹⁷



¹⁷ <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap2/k23p01.html>

Polarisation:

Es wird ein Link zu zwei Simulationsprogrammen angeführt, die sich aber nicht öffnen lassen. Auf den drei Bildern wird gezeigt wie ein Lichtstrahl zuerst durch einen, dann durch zwei gleich eingestellte Polarisatoren und im dritten Bild durch zwei normal gestellte Polarisatoren, läuft.

Es ist auch ein Link zur Modellvorstellung der Polarisation angegeben.

Inhalt:

Als Beispiel für eine Präparation wird die Polarisation angeführt. Wird Licht durch einen Polarisationsfilter geschickt, verliert es die Hälfte seiner Intensität. Das Licht wurde durch den Polarisationsfilter präpariert. Durch einen zweiten Polarisator mit der gleichen Einstellung kann die Präparation des Strahles getestet werden. Wird der zweite Polarisator normal zum ersten gestellt, so wird der Lichtstrahl völlig absorbiert. Daraus kann man folgern, dass diese beiden dynamischen Eigenschaften nicht gleichzeitig präpariert werden können.

Bewertung:

Die Präparation sollte nicht als eigener Punkt im Unterricht behandelt werden, sondern bei gegebenem Anlass erklärt werden. Die beiden Wurfmaschinen zeigen sehr schön die Bedeutung der Präparation. Leider funktionieren manchmal nicht beide Wurfmaschinenexperimente auf der Internetseite.

3. Wellen und Teilchen

Was sie in dieser Lektion erwartet:

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von einzelnen Photonen in einem Interferometer untersucht und der Welle Teilchen Dualismus besprochen.

Es wird geprüft, ob man einem Photon die Eigenschaft „Weg“ zuweisen kann.

Der Welle-Teilchen-Dualismus:

Es ist ein Link zu einer Seite angegeben, auf der Vorstellungen über den Welle Teilchen Dualismus besprochen werden.

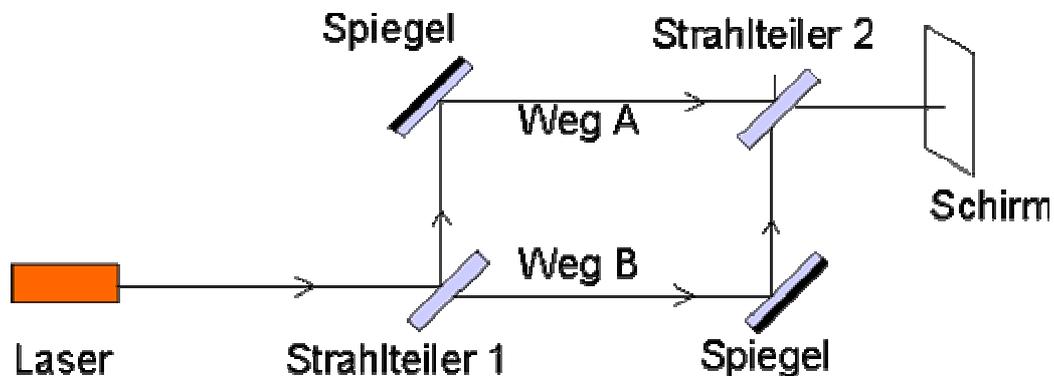
Mit Hilfe eines Bildes wird das Mach-Zehnder-Interferometer beschrieben. Es wird wieder auf Simulationsprogramme hingewiesen, da die Versuche in der Schule kaum durchführbar sind.

Die Interferenz von Laserlicht wird anhand eines Bildes dargestellt. Durch einen Link wird dann noch erklärt, wie die Interferenzmuster zustande kommen.

Inhalt:

Photonen verhalten sich unter bestimmten Bedingungen wie Wellen und unter anderen Bedingungen wie Teilchen.

Bild: ¹⁸



Ein Laserstrahl wird mit Hilfe zweier Strahlteiler und zweier Spiegel zuerst getrennt und dann wieder vereinigt. Das Laserlicht kann so auf zwei verschiedenen Wegen laufen und es kann wegen des Gangunterschiedes zu Interferenzmustern kommen. Das ist ein Beweis für die Wellennatur des Lichtes.

¹⁸ <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k31p01.html>

Vom Lichtstrahl zu einzelnen Photonen:

Eine Animation auf dieser Seite zeigt, dass das Licht immer schwächer wird, wenn es durch mehrerer Graufilter geht.

Inhalt:

Um einzelne Photonen zu untersuchen muss der Lichtstrahl abgeschwächt werden. Man schickt den Strahl so lange durch Graufilter bis man die Photonen nicht mehr wahrnehmen, aber mit einem CCD Element noch einzelne Photonen nachweisen kann.

Interferenz mit einzelnen Photonen:

Es wird auf ein Programm verwiesen, das Interferenzen mit einzelnen Photonen simulieren kann. Es ist aber nicht immer möglich dieses Programm aufzurufen.

Ein angefügtes Bild zeigt einzelne Photonen auf einem Schirm. Durch eine Animation wird gezeigt, dass sich nach einiger Zeit ein Interferenzmuster herausbildet.

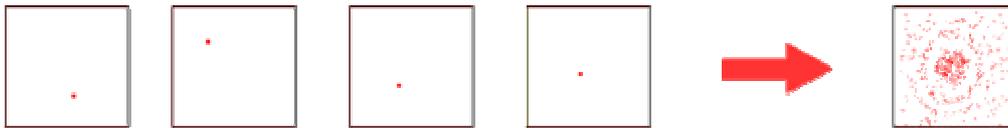
Im letzten Bild werden einzelne Lichtpunkte zu einem Interferenzmuster zusammengeführt.

Inhalt:

Beschießt man einen CCD mit Photonen so löst jedes Photon immer nur einen Detektorbaustein aus. Wenn genügend Photonen auf die Detektoren treffen, kann man ein Interferenzmuster erkennen. Jedes Photon überträgt seine ganze Energie auf einen Detektorbaustein, das ist typisch für ein Teilchen. Das Interferenzmuster ist ein charakteristisches Merkmal einer Welle. Daher lässt sich dieses Phänomen weder alleine mit der Wellen- noch mit der Teilchentheorie erklären.

Führt man ein Experiment durch, in dem man immer nur einzelne Photonen aussendet und verbindet man die Ausschläge dann in einer Grafik, so entsteht auch hier das bekannte Interferenzmuster

Bild: ¹⁹



Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben:

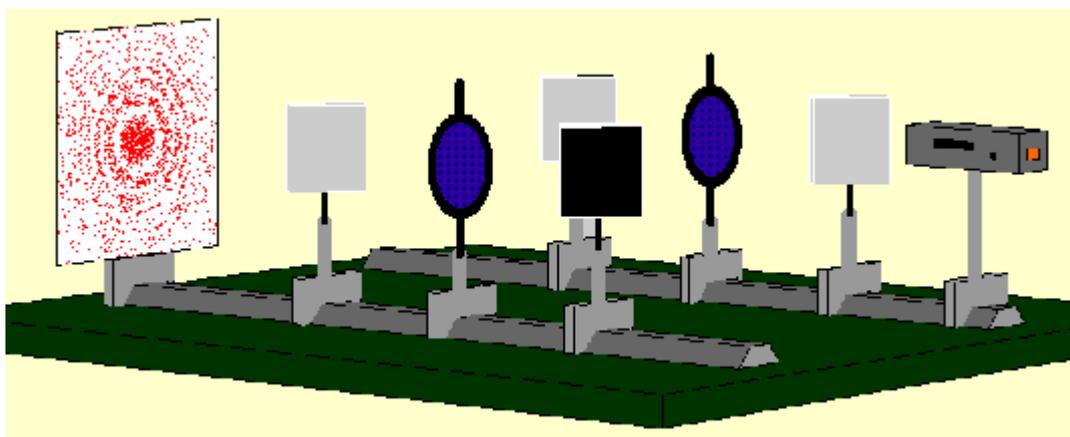
Ein Bild zeigt einen Lichtstrahl, der durch einen Strahlteiler aufgespalten und danach wieder zusammengeführt wird.

In zwei weiteren Versuchen werden in die beiden Strahlengänge Polarisationsfilter eingebracht.

Es gibt auch drei Links zu Seiten, die die Präparation und die Polarisation behandeln. In einem anderen Link wird erklärt, dass es bei polarisiertem Licht nie zu Interferenzen kommt. Die Besonderheit bemerkt man erst, wenn man nur einzelne Photonen abschießt.

Inhalt:

Bild: ²⁰



Um den Photonen eindeutig einen Weg zuweisen zu können, stellt man beim Mach-Zehnder-Interferometer Polarisatoren in beide Strahlengänge. Bei gleicher Ausrichtung der

¹⁹ <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k33p03.html>

²⁰ <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k34p02.html>

Polarisatoren tritt wieder dasselbe Interferenzmuster auf, da nur die Hälfte der Photonen herausgefiltert wird.

Werden die beiden Polarisationsfilter normal zueinander eingestellt, kann man jedem Photon durch Überprüfung der Polarisation einen bestimmten Weg zuweisen. Dadurch erhält man kein Interferenzmuster mehr, sondern nur eine zufällige Verteilung. Dies kann in einer Animation beobachtet werden.

Besitzt ein Photon die Eigenschaft „Weg“?

Anhand eines Bildes wird dargestellt, wie das Photon wissen könnte, wie die Polarisatoren eingestellt sind.

Ein Link erklärt, dass das Interferenzmuster wieder erscheint, wenn man die Weginformation vor dem Schirm wieder auslöscht.

In einer Animation wird ein fiktives Photon gezeigt, das durch einen Strahlteiler halbiert wird. Durch einen Versuch wird aber gezeigt, dass es keine halben Photonen gibt.

In der nächsten Darstellung sieht man, dass in einem Interferometer das Photon immer an einer Stelle gemessen wird.

In zwei Links wird beschrieben, dass dieser Versuch schon praktisch durchgeführt wurde und es nicht möglich ist diese Phänomene nur mit der Wellen- oder der Teilchentheorie zu beschreiben.

Es sind auch zwei Arbeitsblätter verlinkt.

Inhalt:

Besitzt ein Photon die Eigenschaft Weg, so kommt es zu keiner Interferenz, auch wenn man nicht misst welchen Weg das Photon gegangen ist. Es reicht, dass das Photon die Präparation „Weg“ trägt. In der Quantenmechanik ist es also möglich, dass einem Objekt die Eigenschaft „Weg“ nicht zugeschrieben werden kann.

Um entscheiden zu können ob es zu Interferenzen kommt oder nicht, müsste ein lokalisiertes Photon wissen, wie der Polarisator auf der anderen Bahn eingestellt ist. Daraus lässt sich schließen, dass das Photon kein lokalisiertes Gebilde ist.

Man könnte sich vorstellen, dass das Photon durch den Strahlteiler aufgespalten wird und so die Theorie des lokalisierten Teilchens erhalten bleibt. Diese Theorie ist aber falsch.

Mit Hilfe zweier Photonendetektoren, die nach dem ersten Strahlenteiler in den Strahlengang gebracht werden, kann man nachweisen, dass immer nur einer ausschlägt und dass das gemessene Photon die gesamte Energie trägt.

In der Quantenmechanik spielt die Messung eine große Rolle. Wird eine Größe gemessen, bekommt man auch immer einen Wert. Die Messung beeinflusst aber das Ergebnis.

Bei einer Messung findet man immer ein Ergebnis, auch wenn das Quantenobjekt die Eigenschaft gar nicht besitzt.

Bewertung:

Die Kapitel zu Wellen und Teilchen sind auf Grund ihrer Simulationsprogramme recht gut für jene Teile des Unterrichts geeignet, die nicht durch selbst aufgebaute Versuche durchgeführt werden können.

4. Die statistischen Aussagen der Quantentheorie

Übersicht:

In diesem Kapitel wird die Notwendigkeit der Wahrscheinlichkeit in der Quantenmechanik erklärt.

Es ist ein Link angeführt, auf dem man das benötigte Programm zum Doppelspalt herunterladen kann. Eine Erklärung zur Installation und Verwendung ist angefügt.

Das Doppelspaltexperiment mit Licht:

Zuerst wird das Interferenzbild eines Laserstrahls am Doppelspalt gezeigt.

Durch eine Animation wird dargestellt, wie sich ein Interferenzmuster aufbaut.

Inhalt:

Die klassische Erklärung von Interferenz beruht darauf, dass von jedem Spalt eine Elementarwelle ausgeht. Daraus kann man auf die Wellennatur des Lichts schließen.

Wahrscheinlichkeitsaussagen:

Anhand einer Grafik wird ein Versuchsaufbau zum Doppelspaltexperiment dargestellt. Es wird auch das Programm zur Simulierung einzelner Photonen erläutert.

In einem Link wird erklärt, dass die Quantenmechanik nur statistische Aussagen machen kann. Nur in Sonderfällen können einzelne Teilchen beschrieben werden, wenn die Wahrscheinlichkeit 0 oder 1 ist.

Es sind auch einige Arbeitsblätter beigelegt.

Inhalt:

Da man in der Quantenmechanik keine Aussagen über Einzelsysteme machen kann, ist man gezwungen auf statistische Beschreibungen zurückzugreifen. Daher ist es nützlich Ensembles einzuführen.

Bewertung:

Wegen der Animationen kann man diese Seite sehr gut verwenden. Das Programm Doppelspalt.exe darf aufgrund von Lizenzbedingungen nur in deutschen Schulen verwendet werden, wäre aber ein hervorragendes Simulationsprogramm.

5. Elektronen

Übersicht:

Hier wird die Wahrscheinlichkeitsdichte und Wellenfunktion für Quantenobjekte eingeführt. Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation löst den Welle-Teilchen Dualismus ab.

Elektronenbeugung:

In zwei Bildern werden eine Elektronenbeugungsröhre und das Interferenzmuster der Elektronen gezeigt.

Inhalt:

Da bei Elektronen auch Beugungserscheinungen auftreten, kann man darauf schließen, dass Elektronen nicht nur Teilchencharakter sondern auch Welleneigenschaften besitzen.

Experimente mit Elektronen und Atomen:

In zwei Links ist eine Zeittafel mit durchgeführten Experimenten und ein Arbeitsblatt angeführt.

Mit dem heruntergeladenen Programm sollen Doppelspaltexperimente mit Elektronen durchgeführt werden.

Inhalt:

Beim Doppelspaltversuch erkennt man, dass das Interferenzmuster nicht sofort auftritt, sondern immer nur einzelne Energiebeträge gemessen werden. Daraus kann man schließen, dass weder das Wellen- noch das Teilchenmodell alleine das Verhalten der Elektronen beschreiben kann.

Die Wellenlänge von Elektronen:**Inhalt:**

Das Wellenverhalten der Elektronen wird durch die de-Broglie Beziehungen $p = \frac{h}{\lambda}$ charakterisiert.

Vergleich mit klassischen Teilchen:

Mit Hilfe einer Animation sieht man, was passiert, wenn klassische Teilchen auf einen Doppelspalt treffen.

Es werden auch ein Link zu einer pdf Datei über die Ensemble Interpretation in der Quantenmechanik und ein Arbeitsblatt zum Thema angeführt.

Inhalt:

Bei einem klassischen Teilchen wird die Verteilung am Doppelspalt durch die Summe der Einzelverteilungen bestimmt. Für Quantenobjekte gilt das aber nicht.

Wahrscheinlichkeit und Wellenfunktion:

Inhalt:

Für quantenmechanische Objekte kann man eine Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x)$ für die Wahrscheinlichkeit, ein Objekt am Punkt x zu finden, angeben. Es ist aber vorteilhafter mit einer Wellenfunktion $\psi(x)$ zu arbeiten.

$$P(x) = |\psi(x)|^2$$

Durch $\psi(x)$ können Interferenzerscheinungen erklärt werden. $\psi(x)$ gehorcht der Schrödingergleichung und $P(x)$ erfasst den Teilchencharakter. (Die Schrödingergleichung wird aber erst in Kapitel 8 eingeführt.)

Theoretische Herleitung:

Ein Link zu einem Worddokument zeigt die mathematische Beschreibung der Doppelspaltinterferenz.

Inhalt:

Bei klassischen Teilchen wird die Verteilung durch Addition der beiden Wahrscheinlichkeitsdichten berechnet. Bei quantenmechanischen Teilchen gilt dies nicht. Hier müssen die beiden Wellenfunktionen addiert werden: Durch Quadrieren entsteht ein Interferenzterm der dafür verantwortlich ist, dass $P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$.

Bewertung:

Die angeführte Wellenfunktion für Elektronen kann auf diese Weise den Schülern gezeigt werden.

Einzelne Abschnitte können auch in den Unterricht eingebaut werden.

6. Der quantenmechanische Messprozess

Übersicht:

In diesem Kapitel wird gezeigt, dass man Elektronen im allgemeinen die Eigenschaft „Weg“ nicht zuordnen kann. Dem Messen wird in der Quantenmechanik eine wichtige Rolle zugeordnet.

Die Eigenschaft „Ort“:

Inhalt:

Quantenmechanischen Objekten kann man nicht immer eine klassische Eigenschaft wie zum Beispiel „Weg“ zuordnen.

Werden Elektronen durch einen Doppelspalt geschickt, gehen nach der klassischen Anschauung die Hälfte der Elektronen durch den einen und die andere Hälfte durch den anderen Spalt. Also befinden sie sich immer an einem bestimmten Ort. In der Quantenmechanik trifft das nicht zu, da das Elektron die Eigenschaft „Ort“ nicht besitzt.

Messprozess und Komplementarität:

Es soll ein Experiment durchgeführt werden in dem der Ort des Elektrons gemessen wird.

Es ist auch ein Artikel zu Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik verlinkt.

Zusätzlich gibt es auch ein Arbeitsblatt.

Inhalt:

Man kann zwar feststellen durch welchen Spalt das Elektron fliegt, nur führt man dann ein anderes Experiment durch. Es tritt in diesem Fall keine Interferenz auf. Dadurch wird gezeigt, dass komplementäre Eigenschaften wie Interferenz und Ort nicht gleichzeitig bestimmt werden können. Bohr bezeichnete den Umstand, dass schon eine kleine Veränderung der Versuchsanordnung das Versuchsergebnis ändern kann als Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene.

Messungen und Eigenschaften:

In zwei Links werden das Messpostulat und Heisenbergs Interpretation vom Übergang vom Möglichen zum Faktischen besprochen.

Auf dieser Seite laufen die Texte teilweise über den Rand hinaus.

Inhalt:

In der klassischen Physik bedeutet Messen nur die Anerkennung ihres bereits definierten Wertes.

In der Quantenphysik kann man Objekten manche Eigenschaften gar nicht zuschreiben. Wird eine Messung durchgeführt, so wird eines der möglichen Ergebnisse real. Die Wahrscheinlichkeit dieses Ergebnis zu finden, wird durch die Bornsche Wahrscheinlichkeitsformel bestimmt.

Das Messpostulat besagt, dass das Quantenobjekt die durch die Messung bestimmte Eigenschaft nicht schon vor der Messung besessen haben muss.

Misst man die Eigenschaft eines Ensembles, so können die Ergebnisse streuen. Das Ensemble besitzt dann die Eigenschaft Ort nicht. Liefern alle Messungen denselben Ort, dann besitzt auch jedes einzelne Objekt die Eigenschaft Ort.

Zustandsreduktion:

In einem Bild wird eine Elementarwelle ψ dargestellt, die von einem Spalt ausgeht.

Inhalt:

In der Quantenmechanik verändert eine Messung am Doppelspalt den Zustand eines Systems. Ohne die Messung befindet sich das System in einem Zustand einer Überlagerung der beiden Wellenfunktionen. Nach einer Messung ist ein Photon in einem der beiden möglichen Zustände. Diese Eigenschaft wird als Zustandsreduktion oder Kollaps der Wellenfunktion bezeichnet.

Schrödingers Katze:

Anhand zweier Animationen wird der Versuch mit Schrödingers Katze erläutert. Es ist auch ein Artikel verlinkt, der die Dekohärenz ausführlich beschreibt.

Inhalt:

Um Überlagerungszustände im makroskopischen Raum zu simulieren, wurde das Experiment mit Schrödingers Katze entwickelt.

Ohne nachzusehen kann man nicht sagen, ob das Atom zerfallen und daher die Katze tot ist. Der Zustand der Katze ist daher unbestimmt. Die Wellenfunktion würde aussagen, dass die Katze sowohl lebendig als auch tot ist. Die Katze besitzt also die Eigenschaften lebendig oder tot nicht. Die Theorie der Dekohärenz erklärt, dass es in der makroskopischen Welt keine Überlagerungszustände gibt, da ständig Wechselwirkungen mit der Umgebung stattfinden.

Alle-Wege-Modell:

Es sind Literaturangaben zu weiterführenden Büchern angegeben.

Inhalt:

Beim Doppelspaltexperiment besitzt das Elektron, wenn der Ort gemessen wird, eine bestimmte Weegeigenschaft und eine bestimmte Wellenfunktion ψ .

Der überlagerte Zustand der beiden Wellenfunktionen wird Superposition genannt. Man kann zwar immer einen bestimmten Wert messen, vor der Messung kann man aber nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den Ort vorhersagen.

Das Elektron nimmt immer alle möglichen Wege, aber mit unterschiedlichen Intensitäten. Spiegelt man Elektronen an einer Fläche, benutzt das Elektron alle Wege und interferiert am Detektor. Absorbiert man die ungünstigen Wege, so steigt die Intensität am Detektor.

Bewertung:

Ausgewählte Bereiche dieser Seite sind im Unterricht einsetzbar. Manches geht aber über den Lehrplan hinaus.

Sehr gut sind die beiden Simulationen zu Schrödingers Katze. Durch diese Animationen kann man den Schülern die Problematik leichter klar machen.

7. Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Übersicht:

In diesem Kapitel wird die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation besprochen.

Präparation verschiedener Eigenschaften:

Es ist ein Bild angeführt auf dem eine Vorrichtung für den wagrechten Wurf zu sehen ist.

Inhalt:

In der klassischen Mechanik kann man mehrere Eigenschaften gleichzeitig präparieren. In der Quantenmechanik ist das bei manchen Paaren nicht möglich, auch wenn man sie einzeln beliebig genau präparieren kann.

Präparation in der Quantenmechanik:

In zwei Bildern werden ein Laserstrahl und die Aufweitung des Strahls durch einen Spalt dargestellt.

Es ist eine Seite verlinkt auf der die verschiedenen Arten, deren Vor- und Nachteile, die Unbestimmtheitsrelation einzuführen, in Schulbüchern beschrieben werden.

Inhalt:

Je mehr man die Spaltbreite verkleinert, umso weiter wird der Strahl hinter der Blende aufgefächert. Man kann mit diesem Experiment die Ortsstreuung der Photonen verringern dafür erhöht sich aber die Impulsstreuung. Man kann also Ort und Impuls nicht gleichzeitig präparieren.

Die Güte einer Präparation:

Anhand eines Bildes wird gezeigt wie ein Elektronenstrahl durch einen Spalt aufgefächert wird. Die Verteilung ist für zwei Spaltbreiten angegeben.

Inhalt:

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation gibt an, wie gut man in einem quantenmechanischem System Eigenschaften präparieren kann.

Die Güte der Präparation kann man anhand der Testwerte bei einer Messung beurteilen.

Messverfahren und Eigenschaften:

Mittels mehrerer Bilder wird gezeigt, wie Messungen streuen können.

Inhalt:

Man versucht an einem runden und eines quadratischen Plättchens die Eigenschaft „Durchmesser“ zu messen, auch wenn die quadratischen Plättchen diese Eigenschaft nicht besitzen. Beim Kreis ist der Wert eindeutig, aber beim Quadrat kommt es zu Streuungen. Dasselbe passiert, wenn man versucht bei einem Kreis die Seitenlänge zu messen.

Herleitung der Unbestimmtheitsrelation:

Hier kann man ein Arbeitsblatt herunterladen.

Durch einen Versuch mit einem Programm soll das Planksche Wirkungsquantum bestimmt werden.

Inhalt:

Mithilfe von Versuchen kann man die Formel $\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}$ herleiten.

Wird also ein Ensemble von Quantenobjekten so präpariert, dass die Ortsstreuung gering ist, wird dadurch die Impulsstreuung größer und umgekehrt.

Diskussion des Bahnbegriffs:

In einem Bild wird eine Elektronenröhre gezeigt.

Mithilfe eines Link kann ein Worddokument zur Wissenskontrolle für Schüler heruntergeladen werden.

Inhalt:

Da Quantenobjekte nicht gleichzeitig einen bestimmten Ort und einen bestimmten Impuls besitzen, kann der klassische Bahnbegriff nicht angewendet werden. Das Produkt der Streuungen muss immer $\geq h$ (Planksche Konstante) sein.

Die scheinbare wohl definierte Bahn der Elektronen in einer Elektronenröhre kommt nur dadurch zustande, dass durch die kurze Wegstrecke die Streuung kaum nachweisbar ist. Daher widerspricht die erkennbare Bahn nicht der Unbestimmtheitsrelation.

Bewertung:

Von dieser Seite müsste man sich eine eigene Auswahl zusammenstellen und diese dann verwenden. Die ganze Seite würde die Schüler überfordern.

8. Der Weg zur Schrödingergleichung**Übersicht:**

In diesem Kapitel geht man zur quantitativen Beschreibung von Quantenobjekten über. Zusätzlich werden Operatoren und Eigenwertverteilungen eingeführt.

Mathematische Beschreibung von Quantenobjekten:

Inhalt:

Die Physik lässt sich in zwei Kategorien einteilen:

1. qualitatives Verständnis für die grundlegenden Wirkungszusammenhänge der Naturphänomene.
2. quantitatives Beschreiben der Naturphänomene.

Präparation von Elektronen auf eine bestimmte kinetische Energie:

In einem Bild wird gezeigt wie in einer Kathodenstrahlröhre Elektronen auf kinetische Energie präpariert werden.

Inhalt:

Durch Anlegen einer Beschleunigungsspannung kann man Elektronen auf die Eigenschaft Geschwindigkeit präparieren.

Die Wellenfunktion eines freien Elektrons:

Es wird eine Momentaufnahme einer Welle gezeigt.

In einem Link wird beschrieben, wie man im Unterricht komplexe Zahlen vermeiden kann.

Inhalt:

Um Elektronen quantitativ zu beschreiben, benutzt man eine harmonische Welle.

Operatoren für physikalische Größen:

Anhand eines Bildes wird nochmals gezeigt, wie ein Elektron auf kinetische Energie präpariert wird und erklärt, dass dieses einer Wellenfunktion entspricht. In zwei anderen Bildern wird gezeigt, dass ein mathematischer Operator analog zu einer Messung verwendet werden kann.

Inhalt:

Das Messen ist dem Anwenden eines Operators gleichzusetzen.

Der Operator der kinetischen Energie:

Inhalt:

Ein Operator der kinetischen Energie soll die Wellenfunktion bis auf konstante Faktoren reproduzieren und er soll Informationen über den Wert der kinetischen Energie liefern.

Die Eigenwertgleichung:

Ein Bild stellt die Eigenwertgleichung als Maschine dar.

Inhalt:

Durch Einsetzen in die Eigenwertgleichung kann man feststellen, ob ein Ensemble eine bestimmte Eigenschaft besitzt. Wird die Eigenwertgleichung nicht erfüllt, besitzt das Quantenobjekt die geforderte Eigenschaft nicht.

Der Operator der Gesamtenergie:

In einem Bild wird ein Experiment gezeigt, in dem Elektronen zweimal beschleunigt werden. Ein Diagramm zeigt den dazugehörige Potentialverlauf.

Inhalt:

Die quantenmechanische Gesamtenergie kann man berechnen, indem man Elektronen, nachdem sie auf eine bestimmte Energie präpariert wurden, nochmals einer Beschleunigungsspannung unterwirft.

Zuerst bestimmt man die Wellengleichung für ein konstantes Potential.

Der Operator der Gesamtenergie setzt sich aus den Operatoren der potentiellen und der kinetischen Energie zusammen.

Die Grundgleichung der Quantenmechanik:

Inhalt:

In einem stationären Zustand erfüllt die Wellenfunktion $\psi(x)$ die stationäre Schrödingergleichung, die der Eigenwertgleichung für die Gesamtenergie entspricht.

Das Auffinden stationärer Zustände mit der Schrödingergleichung:

Anhand eines Bildes soll die Vorgehensweise zum Lösen der Schrödingergleichung erläutert werden.

Über einen Link kann man eine Aufgabensammlung zur Quantenmechanik bekommen.

Inhalt:

Um die Wellenfunktion aufzufinden, muss man zuerst die Gleichung des Potentials ermitteln. Durch das Einsetzen des Potentials in die Schrödingergleichung und das Lösen der Eigenwertgleichung kommt man dann auf die Wellenfunktion.

Bewertung:

Diese Seite kann für den Unterricht in der Oberstufe nicht übernommen werden, sie würde die Schüler überfordern. Die Seite könnte als Wissensauffrischung für die Lehrkraft dienen.

9. Übersicht über den quantenmechanischen Formalismus

Übersicht:

In diesem Kapitel werden quantenmechanischen Formalismen besprochen.

Zustände:

Anhand eines Bildes wird dargestellt wie man von der Präparation zur Wellenfunktion kommt.

Inhalt:

In der klassischen Mechanik wird der Zustand eines Objekts durch Ort und Geschwindigkeit angegeben. Mit Hilfe der Newtonschen Gesetze kann man die Bahn des Objekts berechnen.

Durch die mathematische Form der Wellenfunktion bekommt man die vollständige Information über das System. Man kann dann die Wahrscheinlichkeitsverteilung, den Erwartungswert und die Streuung berechnen.

Die Präparation eines Ensembles von Quantenobjekten bestimmt dessen Wellenfunktion.

Üblicherweise werden die Wellenfunktionen normiert, damit die Wahrscheinlichkeit das Elektron irgendwo im betrachteten Raum zu finden, eins beträgt.

Operatoren:

Anhand einer Skizze soll veranschaulicht werden, wie die Eigenwertgleichung eine Aussage über die Eigenschaft eines Ensembles macht.

Inhalt:

In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele für Operatoren angeführt.

Mit Hilfe von Operatoren ist es möglich Informationen aus Wellengleichungen zu extrahieren. Will man wissen, ob ein Elektron eine bestimmte Eigenschaft besitzt, muss man den entsprechenden Operator anwenden.

Um die Eigenwerte der Energie bestimmen zu können, muss man die stationäre Schrödingergleichung lösen.

Erwartungswerte:

Anhand einer Grafik wird die Mittelwertbildung erläutert.

Inhalt:

Mithilfe von Operatoren ist es auch möglich einen Erwartungswert zu berechnen. Dieser ist eine statistische Größe, die sich auf mehrere Messungen von verschiedenen Mitgliedern eines Ensembles bezieht.

Vertauschungsrelation:

Inhalt:

Bei gewissen Operatoren, wie zum Beispiel Ort und Impuls, spielt die Reihenfolge eine Rolle, mit der sie auf die Wellenfunktion angewendet werden können. Diese Eigenschaften sind mit der Unbestimmtheitsrelation verbunden. Es ist nicht möglich ein Ensemble auf diese beiden Eigenschaften zu präparieren.

Bewertung:

Der Inhalt dieser Seite übersteigt den Stoffumfang, den man in der AHS unterrichten soll.

10. Potentiale

Übersicht:

In diesem Kapitel wird die Schrödingergleichung an einigen Spezialfällen gelöst und es werden einige Programme zur Quantenmechanik vorgestellt.

Der unendlich hohe Potentialtopf:

Schülern ist es nur selten möglich mit ihrem Wissen die Schrödingergleichung zu lösen.

Es wird ein Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden dargestellt.

Anhand von drei Bildern werden die ersten drei Zustände von Wellenfunktionen und Wahrscheinlichkeitsdichten beschrieben.

Über zwei Links kommt man auf einen Artikel über den Potentialtopf und eine Seite die die Verbindung zur Chemie beschreibt.

Inhalt:

Als ein praktisches für Schüler lösbares Beispiel zum Lösen der Schrödingergleichung kann man den eindimensionalen unendlich hohen Potentialtopf verwenden. Daran sieht man, dass

eingesperrte Elektronen nur ganz bestimmte Energiewerte annehmen können und an ganz bestimmte Raumbereiche gebunden sind. Solche Objekte nennt man gebunden.

Die Wellenfunktion verschwindet in den Bereichen wo das Potential unendlich groß ist. Die möglichen Energiewerte werden durch die Quantenzahl bestimmt.

Über die Normierung lassen sich die restlichen Konstanten bestimmen.

Der Potentialtopf mit endlicher Tiefe:

In einer Skizze wird ein endlich tiefer Potentialtopf dargestellt.

Ein Bild zeigt eine Welle in einem Potentialtopf.

Anhand eines Links wird auf die Stetigkeitsbedingungen hingewiesen.

Inhalt:

Da die Wellenfunktion außerhalb des Potentialrandes nicht den Wert Null annehmen muss, wird der Potentialtopf mit endlicher Tiefe eingeführt.

Zuerst werden nur Lösungen betrachtet, die symmetrisch um $x = 0$ verteilt sind. Überlagert man dann symmetrische und die antisymmetrische Lösung kommt man auf die allgemeine Lösung.

Außerhalb des Potentialtopfes nimmt die Wellenfunktion exponentiell ab. Ist die Potentialwand unendlich hoch, so geht die Wellenfunktion gegen Null.

Simulationsprogramme:

Hier werden einige Programme vorgestellt, mit deren Hilfe man die Schrödingergleichung und Potentiale veranschaulichen kann.

Bewertung:

Das Simulationsprogramm zur Schrödingergleichung kann nur in einem Vertiefungsfach mit besonders interessierten Schülern verwendet werden.

11. Der Tunneleffekt

Übersicht:

In diesem Kapitel wird der Tunneleffekt besprochen. Auf diesem Effekt beruht das Rastertunnelmikroskop.

Der Tunneleffekt:

Anhand einer Skizze werden der Potentialverlauf und die Gesamtenergie veranschaulicht. Durch einen Link sieht man, warum die Lösung für die Potentialbarriere nur eine Näherung sein kann.

Inhalt:

In der klassischen Physik können Teilchen eine Barriere nur dann überwinden, wenn deren Energie größer ist als die Höhe der Barriere. In der Quantenmechanik ist das anders. Hier wird ein Teil der Welle reflektiert, der Rest dringt in die Barriere ein.

Daher muss man für das Innere des Potentialtopfes und für die Barriere die Schrödingergleichung einzeln aufstellen. Will man eine Lösung für das ganze Gebiet, muss man die Übergänge stetig differenzierbar zusammensetzen.

Um zu bestimmen, wie wahrscheinlich eine Durchtunnelung ist, wird der Transmissionsgrad eingeführt.

Anwendung:

In diesem Kapitel werden Anwendungen wie das Feldelektronenmikroskop und das Rastertunnelmikroskop und einige Bilder von Aufnahmen mit Feldelektronenmikroskopen oder Rastertunnelmikroskopen gezeigt. Es wird auch noch der α -Zerfall besprochen. Zusätzlich wird noch erläutert, dass für die Kernfusion in der Sonne auch der Tunneleffekt verantwortlich ist.

Simulationsprogramme:

Hier werden zwei Programme vorgestellt, die den Tunneleffekt veranschaulichen sollen.

Der Tunneleffekt in der Schule:

In einem Bild wird der Tunneleffekt anhand der Reflexion graphisch erläutert.

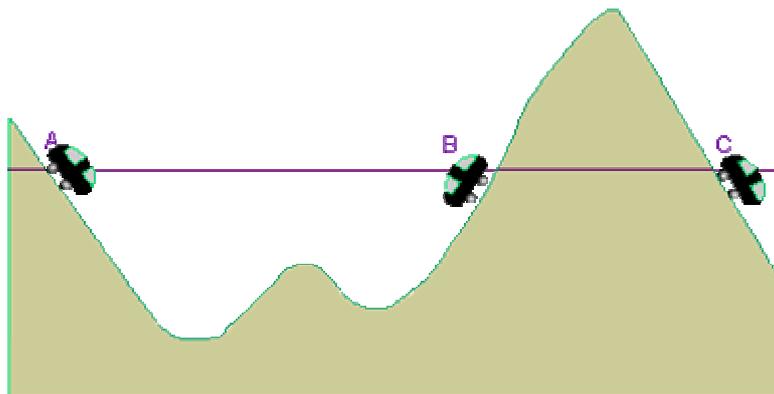
Durch einen Link wird ein Versuchsaufbau zum Tunneleffekt beschrieben.

Inhalt:

Anhand der Totalreflexion von Licht oder Mikrowellen an einem Prisma kann man den Tunneleffekt sehr leicht und anschaulich demonstrieren. Bringt man zwei Prismen dicht zusammen, repräsentiert der Spalt zwischen ihnen die Potentialbarriere. Ist der Abstand klein genug, kann man im zweiten Prisma einen Lichtstrahl erkennen. Je näher die beiden Prismen sind, sprich je kleiner die Potentialbarriere ist, desto mehr Licht wird durchgelassen.

Den Tunneleffekt kann auch durch eine Achterbahn veranschaulichen.

Bild: ²¹



²¹ <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap11/k114p02.html>

Bewertung:

Von dieser Seite sind vor allem die Anwendungen für den Unterricht interessant, besonders der Tunneleffekt beim Feldelektronenmikroskops, Rastertunnelmikroskop, α -Zerfall und die Kernfusion in der Sonne.

Die Seite „Der Tunneleffekt in der Schule“ ist besonders gut, da der Versuch mit den beiden Prismen auch direkt durchgeführt werden kann und die Theorie damit untermauert wird.

12. Hinführung zum quantenmechanischen Atommodell

Übersicht:

In diesem Kapitel wird der dreidimensionale Potentialtopf besprochen.

Dreidimensionaler Potentialtopf:

Der Dreidimensionale Potentialtopf wird durch eine Skizze dargestellt.

Anhand einer anderen Abbildung wird die Wahrscheinlichkeitsdichte beim Potentialtopf veranschaulicht, wenn die Quantenzahlen gleich eins sind.

Mithilfe eines weiteren Links wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ein Elektron in einem Wasserstoffatom beschrieben.

Inhalt:

Man kann das Wasserstoffatoms mit einem unendlich tiefen Potentialtopf vergleichen. Dies gilt allerdings nur im dreidimensionalen Raum. Daher muss aus der eindimensionalen Schrödingergleichung die dreidimensionale Schrödingergleichung hergeleitet werden. Den Operator der kinetischen Energie erhält man, indem man die kinetischen Energien der einzelnen Raumrichtungen addiert.

Das Potential im Inneren eines Topfes ist konstant, daher ist der Lösungsansatz das Produkt der eindimensionalen Lösungen. Es gibt eine große Anzahl von möglichen Lösungen, da es drei voneinander unabhängiger Quantenzahlen gibt. Alle Zustände besitzen dieselbe Energie, wenn die Summe ihrer Quantenzahlen gleich ist.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen entsprechen den aus der Chemie bekannten Orbitalen.

Das Bohrsche Atommodell:

Inhalt:

Mithilfe der Linienspektren wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert der Aufbau einfacher Gase untersucht.

Das von Bohr aufgestellt Atommodell ist teilweise noch bis heute gültig.

Abschied vom Bohrschen Atommodell:

Inhalt:

Durch die Entwicklung der Quantentheorie zeigte sich, dass das Bohrsche Atommodell nicht mehr als richtig angesehen werden kann. Die Annahme, dass Elektronen sich auf wohl definierten Bahnen um den Kern bewegen, wurde durch die Quantentheorie widerlegt.

Ist das Bohrsche Atommodell noch zeitgemäß?

In diesem Kapitel wird G. Sauer zitiert, der erläutert, warum das Bohrsche Atommodell auch noch heute einen großen Stellenwert in der Schule einnimmt.

Es werden auch einige Vor- und Nachteile des Bohrschen Atommodells angeführt.

Simulationsprogramme:

Hier werden Programme vorgestellt, mit denen Emissions- und Absorptionsspektren verschiedener Lichtquellen simuliert werden können.

In einem Programm wird das Bändermodell beschrieben, auf dem ein Laser beruht.

Das nächste Programm erläutert die Fluoreszenz anhand einer Leuchtstoffröhre.

Die Berechnung der Energieniveaus zu verschiedenen Potentialen kann man im letzten Programm durchführen lassen.

Bewertung:

In dieser Internetseite wird vom Bohrschen Atommodell ausgegangen und zur Quantisierung der Energie und der Frequenz der abgegebenen Photonen übergewechselt.

Vor- und Nachteile des Bohrschen Atommodells werden sehr anschaulich dargestellt.

Diese Seite könnte in den Unterricht eingebaut werden.

13. Energiewerte des Wasserstoff-Atoms durch Kastenpotential-Näherung

Das Problem:

Inhalt:

In der Schule muss man sich mit Vereinfachungen zufrieden geben, wie zum Beispiel dem Bohrschen Atommodell. Diese Vorstellung ist aber problematisch, da das Ziel des Quantenmechanik-Unterrichts die Abkehr von den klassischen Denkweisen sein sollte.

Grundidee:

Anhand einer Grafik werden das klassische und das quantenmechanische Potential dargestellt.

Inhalt:

Wenn Näherungen bereits im klassischen Potential durchgeführt werden, kann die anschließende quantenmechanische Rechnung exakt durchgeführt werden. Das Coulomb-Potential wird durch ein Kastenpotential mit unendlicher hohen Potentialwänden ersetzt. In diesem Fall handelt es sich um einen kugelförmigen Potentialtopf mit dem Radius R .

Anpassen des Potentialtopfs:

In einer Grafik wird ein Teilchen in einem Potential dargestellt.

Inhalt:

In einem klassischen Atom kann sich das Elektron nicht beliebig weit vom Kern entfernen. Wenn es den Umkehrpunkt erreicht hat, besitzt es die maximale potentielle Energie. Würde es diesen Punkt überschreiten, wäre die potentielle Energie höher als die Gesamtenergie.

Ermittlung der Potentialtopf-Tiefe:

Mit drei Links wird auf Verständnisprobleme hingewiesen, eine Möglichkeit vorgestellt, wie man die Mittelung im Unterricht vorbringen könnte und eine exaktere Methode angesprochen.

Inhalt:

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie man die Potentialtopftiefe berechnen kann.

Berechnung der Energiewerte:

In einem Link werden noch einmal der eindimensionale und der dreidimensionale Potentialtopf besprochen.

Inhalt:

Um die Rechnung weiter zu vereinfachen wird die Potentialkugel durch einen Potentialwürfel ersetzt. Hier beschränkt man sich auf Zustände, die keine Raumrichtung aufweisen. Dadurch kann man den Elektronenzustand durch eine einzige Quantenzahl beschreiben. Abschließend wird das Energieniveau des Wasserstoffatoms berechnet.

Diskussion der Methode:

In einem Link wird die Approximation des Kastenpotentials beschrieben. Zusätzlich ist noch eine Literaturangabe zur Didaktik angeführt.

Inhalt:

Auf der letzten Seite werden noch einmal die Vor- und Nachteile der besprochenen Methode angeführt.

Bewertung:

Diese Seite versucht vom Bohrschen Atommodell zur Quantenmechanik zu wechseln. Man sollte zumindest probieren diesen Übergang den Schülern zu vermitteln. Die Grafiken in den Internetseiten können dabei behilflich sein.

Am Ende jedes Kapitels sind noch einige Punkte angehängt.

Selbstkontrolle:

Zu den besprochenen Punkten eines Kapitels werden verschiedene Fragen gestellt.

Zusammenfassung:

Die einzelnen Kapitel werden hier nochmals kurz vorgestellt.

Fragebogen:

Fragen wie Verwendbarkeit im Unterricht und Aufbau sind hier nachzulesen.

Einführung in Quantenmechanik

<http://wwwcs.upb.de/cs/ag-madh/WWW/ziegler/qm.html>

Aufbau:

Die Seite ist in sechs Unterkapitel eingeteilt. Über ein Inhaltsverzeichnis kann man schnell auf dieser Seite navigieren.

Design:

Auf dieser Seite gibt es mehrere Bilder und eine Animation, die den Text auflockern: ein animiertes Bild eines Atoms, die Bildern zur Quantenmechanik wie das Experiment zu Schrödingers Katze und das Bild eines Schifahrers, der „durch“ einen Baum fährt.

Voraussetzungen:

Der Text ist populärwissenschaftlich geschrieben und da er keine Formeln enthält, ist er auch für Laien leicht verständlich.

Links:

Es gibt einige Links zu weiteren Bildern und einigen anderen Internetseiten, die dieselben Themen bearbeiten.

Im Letzten Kapitel werden noch 9 Schriftstücke angeführt, die diese Themen behandeln.

Inhalt:

In der Einleitung werden einige Phänomene der Quantenmechanik angeführt. Der Autor ist der Meinung, dass nicht die Quantenmechanik mysteriös ist, sondern nur einige ihrer Interpretationen.

Wofür Quantenmechanik?:

Die klassische Mechanik gilt nur für makroskopische Körper wie zum Beispiel Billardkugeln oder Planeten. Die Quantenmechanik beschreibt das Verhalten von Mikroteilchen (Elektronen, Protonen, ...). Erscheinungen wie Linienspektren können mit der klassischen Mechanik nicht beschrieben werden.

Die klassische Mechanik wird als makroskopischer Grenzfall der Quantenmechanik bezeichnet. Die Differenz der Messergebnisse der klassischen Mechanik und der eines gekoppelten Systems von Mikroteilchen liegt normalerweise unter der Messgenauigkeit.

Was ist Quantenmechanik?

Geschichtlich liegen die Anfänge der Quantenmechanik am Beginn des 19. Jahrhunderts und gehen auf Bohr und Sommerfeld zurück. Bis heute sind die Auffassungen über die Interpretation der Quantenmechanik unterschiedlich. Man sollte daher immer angeben von welcher Interpretation der Quantenmechanik man spricht. Hierfür werden einige Beispiele wie die Kopenhagener Schule, die Teilchendichte Interpretation, Bohrs Interpretation, die Schrödingersche Materiewellen-Theorie und die „Halt’s-Maul-und-rechne!“ Theorie angeführt.

Der Autor ist der Meinung, dass die Quantenmechanik nach Ludwig eine herausragende Rolle spielt. Diese beschreibt keine Einzelsysteme und es treten auch nicht die Paradoxien der anderen Interpretationen auf. Auf diese Interpretation wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Was ist Quantenmechanik NICHT?

Die Quantenmechanik ist eine statistische Theorie und sie macht nur wenige Aussagen über Einzelsysteme.

Es macht auch nur wenig Sinn die Wellenfunktion eines Schwarzen Loches oder den Eigenzustand des Universums zu beschreiben.

Auf Grund der Unschärferelation kann man Ort und Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt messen und es gibt auch keine Energie Zeit Unschärfe, da die Zeit keine Observable sondern ein Parameter ist.

Der Welle-Teilchen-Dualismus bezieht sich auf statistische Gesamtheiten, einzelne Teilchen sind keine Materiewellen.

Der Betrag der Wellenfunktion über die Zeit ist gleich 1. Das bedeutet, dass die Gesamtwahrscheinlichkeit für alle Zeiten gleich eins ist.

Als Beispiel wird angeführt, dass beim Tunneleffekt ein kleiner, zuvor nicht bestimmter Teil, der statistischen Gesamtheit mit Lichtgeschwindigkeit den Potentialwall überwindet. Ein überlichtschneller Informationstransport ist auch hier nicht möglich.

Schwachpunkte der Quantenmechanik:

Die Quantenmechanik beschreibt nur die statistische Gesamtheit, hat aber keine Erklärung für die Erzeugung oder Vernichtung von Teilchen.

Die Wechselwirkungen mit Licht kann nur halbklassisch erklärt werden und die spontane Emission bleibt daher unbeantwortet.

Die Quantenmechanik nimmt den Hamiltonoperator als gegeben an. Bis jetzt gibt es keine befriedigende Synthese zwischen der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie.

FAQ's zur Quantenmechanik:

Hier werden Antworten auf Fragen behandelt wie zum Beispiel: Ist ein Elektron eine Welle oder ein Teilchen? Woher weiß das Elektron, dass es einen zweiten Spalt gibt? Oder ob Schrödingers Katze noch lebt.

Bewertung:

Diese Seite ist sehr einfach geschrieben und eignet sich nicht für den Unterricht. Einige Bilder kann man herauskopieren und in den Unterricht einbauen, wie zum Beispiel den quantenmechanischen Schifahrer.

Quanten-Gickse

<http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Quantentheorie/gicks/?anzeige=augen>

Aufbau:

Diese Seiten sind in einen kurzen klassischen und einen ausführlicheren quantenmechanischen Bereich unterteilt.

Es können vom Benutzer mehrere Einstellungen vorgenommen werden. Wird eine Observablen angeklickt, so sieht man, dass die anderen Observablen nicht mehr bestimmbar sind. Man kann das Gicks auch auf eine bestimmte Observable präparieren.

Design:

Die Seiten sind mit einigen farbigen Bildern und Animationen ausgestattet.

Voraussetzungen:

Diese Seite ist relativ leicht zu verstehen, auch wenn man keine Vorkenntnisse aus der Quantenmechanik besitzt. Es werden kaum Formeln verwendet und die angesprochenen Themen werden gut erklärt.

Links:

Auf dieser Seite sind zwei Links zu anderen Quantenmechanikseiten angeführt. Auch die E-Mailadressen der Autoren sind verlinkt.

Quanten-Gickse:

Anhand dreier Bilder werden Möglichkeiten von klassischen Gicksen dargestellt.

Mithilfe eines kleinen Programms wird erklärt, dass bei Quantengicksen nur eine Observable scharf bestimmt werden kann.

Man kann auch Listen mit allen möglichen Observablen und Messausgängen aufrufen.

Inhalt:

Quanten-Gickse illustrieren, was es mit den Quantenzuständen und den Messverfahren auf sich hat. Es gibt vier Observablen, die je zwei Zustände annehmen können.

Klassische-Gickse:

Bei einem klassischen Gicks besitzt jede Observable einen ganz bestimmten Wert. Dies wird an drei Bildern veranschaulicht.

Quanten-Gickse:

Bei Quanten-Gicksen kann nur eine Observable scharf bestimmt werden. Nach der Messung befindet sich das Gicks im Eigenzustand dieser Observablen, die anderen Messwerte sind dann unscharf.

Mithilfe einer interaktiven Figur in einem Eigenzustand kann man einen anderen Zustand durch einen Mausklick messen. Vor der Messung gibt es zwei Wahrscheinlichkeiten für die Messausgänge.

Nach dem Messen befindet sich das Gicks in einem neuen Eigenzustand und die ursprüngliche Observable ist unbestimmt.

Misst man eine Observable, besitzt diese einen scharfen Wert, das Ergebnis steht daher mit Sicherheit fest, misst man eine andere Observable sind beide Ausgänge möglich.

Es wird vorgeschlagen, dass eine Versuchsreihe mit Quanten-Gicksen durchgeführt wird, um die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Messresultate zu bestimmen, um dadurch ein besseres Verständnis über Quantengickse zu bekommen.

Manche Observablen und Zustände sind einander ähnlicher als andere.

Mit einem Abschlussexperiment wird gezeigt, dass unbekannte Zustände nicht ohne weiteres herausgefunden werden können.

Man benötigt zwei Personen A und B wobei A den Bildschirm sehen kann, B aber nicht. A präpariert einen Zustand seiner Wahl und B muss herausfinden welcher es ist. Dazu darf B eine Observable vorschlagen die gemessen werden soll. A teilt B das Ergebnis mit und B muss versuchen den ursprünglichen Zustand zu erraten, was aber nicht möglich ist.

EPR-Paradoxon und Bellsche Ungleichung für Gickse:

Mithilfe eines interaktiven Programms können EPR-Paare erzeugt und Messungen an ihnen durchgeführt werden.

Anhand zweier Links wird der Beweis der Bellschen Ungleichung vorgestellt und eine zusätzliche Seite auf der das EPR-Paradoxon genauer besprochen wird.

Inhalt:

Untersucht man die Unschärfe in der Quantenmechanik mithilfe der Quanten-Gickse, sieht man, dass sie sich nicht durch verborgene klassische Ursachen beschreiben lässt.

EPR-Versuchsaufbau:

Es können EPR-Paare erzeugt werden, an denen Messungen durchgeführt werden können.

Durchführen eines Korrelationsexperiments:

In diesem Abschnitt wird die Versuchsdurchführung beschrieben.

Eigenschaften des EPR-Zustands:

Mithilfe eines Programms können EPR-Paar erzeugt werden, die anfangs keine scharfen Werte besitzen. An diesen Paaren werden Messungen durchgeführt.

Wenn das EPR-Paar erzeugt wird, besitzen die beiden Gickse denselben Quantenzustand. Führt man nur eine Messung durch, sind beide Messausgänge gleichwahrscheinlich. Wird bei beiden Gicksen dieselbe Observable gemessen, sind die Ergebnisse entgegengesetzt. Bei mehreren Messungen, sind die Ergebnisse nicht mehr zusammenhängend. Werden verschiedene Observablen gemessen, können alle Kombinationen auftreten.

Das EPR-Paradoxon und was paradox daran ist:

Die Gickse können nicht miteinander kommunizieren, wenn sie gleichzeitig gemessen werden. Man findet aber bei jeder Messung immer gegensätzliche Eigenschaften.

Eine mögliche Erklärung wäre, dass von vornherein alle Observablen bestimmt sind, was aber der Quantenmechanik widersprechen würde.

Wenn man bei den Gicksen zwei unterschiedliche Observablen misst, könnte man darauf schließen, dass das andere Gicks die entgegengesetzte Eigenschaft besitzt. Dadurch wären zwei Zustände scharf bestimmt und die Unbestimmtheit widerlegt.

Die Bellsche Ungleichung und ihre Verletzung im Gicks-System:

Will man dieses Problem durch physikalische Experimente klären, muss man bestimmten Eigenschaften den Charakter 1 und den Gegeneigenschaften den Charakter -1 zuweisen.

Führt man jetzt mehrere Testreihen durch und berechnet den Durchschnitt der gleichen minus der verschiedenen Charaktere. Daraus kann man ablesen, wohin die Gickse tendieren. Wenn man die Ergebnisse der drei Messwerte voneinander subtrahiert, muss das Ergebnis nach Bell kleiner gleich eins sein.

Diese Ungleichung wird hier aber verletzt. Dadurch ist das EPR Paradoxon widerlegt. Die Gickse sind also miteinander verschränkt, daher kann man sie nicht als Summe ihrer Teile, sondern nur als Ganzes verstehen. Diesen Zustand bezeichnet man als Nichtlokalität.

Teleportation von Quanten-Gicksen

Der Versuchsaufbau wird anhand eines Programms mithilfe der Gickse erläutert.

Inhalt:

Aufbau des Teleportations-Experiments:

Hier kann die Quantenteleportation simuliert werden.

Versuchsdurchführung:

In diesem Abschnitt wird beschrieben wie die Quantenteleportation mithilfe des Programms durchgeführt werden kann.

Wieso funktioniert die Teleportation?

In diesem Kapitel wird der Versuch der Quantenteleportation und dessen Durchführung besprochen. Es werden die einzelnen Schritte der beiden Versuchspersonen erläutert und beschrieben, was bei den einzelnen Schritten passiert.

Was ist daran bemerkenswert?

Während des gesamten Versuches kennt niemand den Zustand des zu teleportierenden Teilchens. Würde eine Observable gemessen, wäre das Gicks in einem Eigenzustand der Observablen und nicht mehr im ursprünglichen Zustand. Da der Zustand aber nur übertragen werden soll, ist es nicht nötig ihn zu messen.

Was ist eigentlich teleportiert worden?

Bei der Quantenteleportation werden nur Informationen über ein System transportiert. Man kann auch Informationen über Elektronen transportieren.

Überlichtgeschwindigkeit?

Da die Information über die Transformation, nur auf dem klassischen Wege übertragen werden kann, ist die Übertragung nicht überlichtschnell.

Bewertung:

Die Seite ist meiner Meinung nach für jüngere Internetnutzer, beispielsweise für Schüler, geschrieben worden.

Die Unschärfe bei Messungen in der Quantenmechanik ist hier sehr leicht verständlich dargestellt. Durch die Animation mit den Gesichtern wird die Unfähigkeit der Messgenauigkeit im quantenmechanischen Bereich aufgezeigt.

Quantenmechanik – online

<http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/qm-online.html>

Aufbau:

Die Seite ist in 14 Unterseiten aufgeteilt. Zu manchen Kapiteln gibt es noch Videos zur besseren Veranschaulichung, die auf den jeweiligen Seiten verlinkt sind. Es ist ein Link angegeben, unter dem man sich bei Bedarf den nötigen Player herunterladen kann.

Auf den Seiten kann über Buttons vor und zurück navigiert werden.

Die Seite wurde im Jahr 2000/2001 online gestellt und seither kaum modifiziert.

Design:

Die Seiten sind eher einfach, weiß auf schwarz und sachlich gehalten. Dazu gibt es nur wenige erklärende farbige Bilder.

Voraussetzungen:

Da diese Seite aufbauend strukturiert und leicht zu verstehen ist, braucht man keine besonderen Vorkenntnisse. Man sollte die Seiten aber der Reihe nach durcharbeiten, da einem sonst die nötigen Grundlagen für die späteren Seiten fehlen. Auf den meisten Seiten wird das nötige Wissen nochmals kurz angesprochen.

Links:

An einige Kapitel sind weiterführende Links zu weiteren Seiten angehängt. Auf diesen können zusätzliche Informationen zu den Themenbereichen nachgelesen werden.

Wie schauen eigentlich die Atome aus?

An dieses Kapitel sind Links zu weiterführenden Seiten für zusätzliche Informationen angehängt.

Inhalt:

Alle Stoffe sind aus Atomen aufgebaut.

Der Großteil der Masse ist in einem im Verhältnis zum Atom kleinen Kern vereinigt. Elektronen umlaufen diesen Kern.

Die weit verbreitete Vorstellung, dass ein Atom einem Planetensystem gleichzustellen ist, ist nicht haltbar, da man damit einige Eigenschaften der Atome nicht erklären kann.

Unser heutiges Verständnis von Atomen:

Auf dieser Seite ist eine Wellenfunktion abgebildet, die einen möglichen Zustand eines Wasserstoffatoms beschreibt.

Es ist auch ein Video über die Darstellung einer Wellenfunktion auf dieser Seite verlinkt.

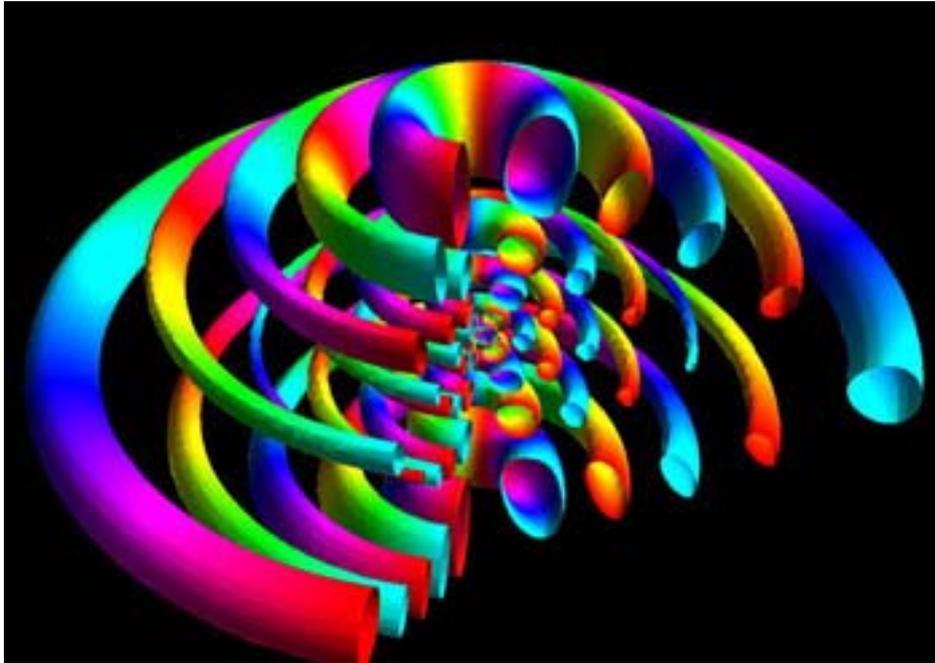
Zusätzlich sind noch zwei Links zu weiterführenden Seiten angegeben.

Inhalt:

Die Entwicklung der Quantenmechanik kann als Grundlage für das heutige Verständnis der Atome betrachtet werden.

Die Quantenmechanik beschreibt die Natur nur abstrakt und macht daher keine Aussagen über das Aussehen der Atome. Danach wird noch eine Lösung der Schrödingergleichung eines Atoms beschrieben und gezeigt, dass die Wellenfunktionen visualisiert werden kann.

Bild: ²²



Bilder von elektronischen Zuständen des Atoms:

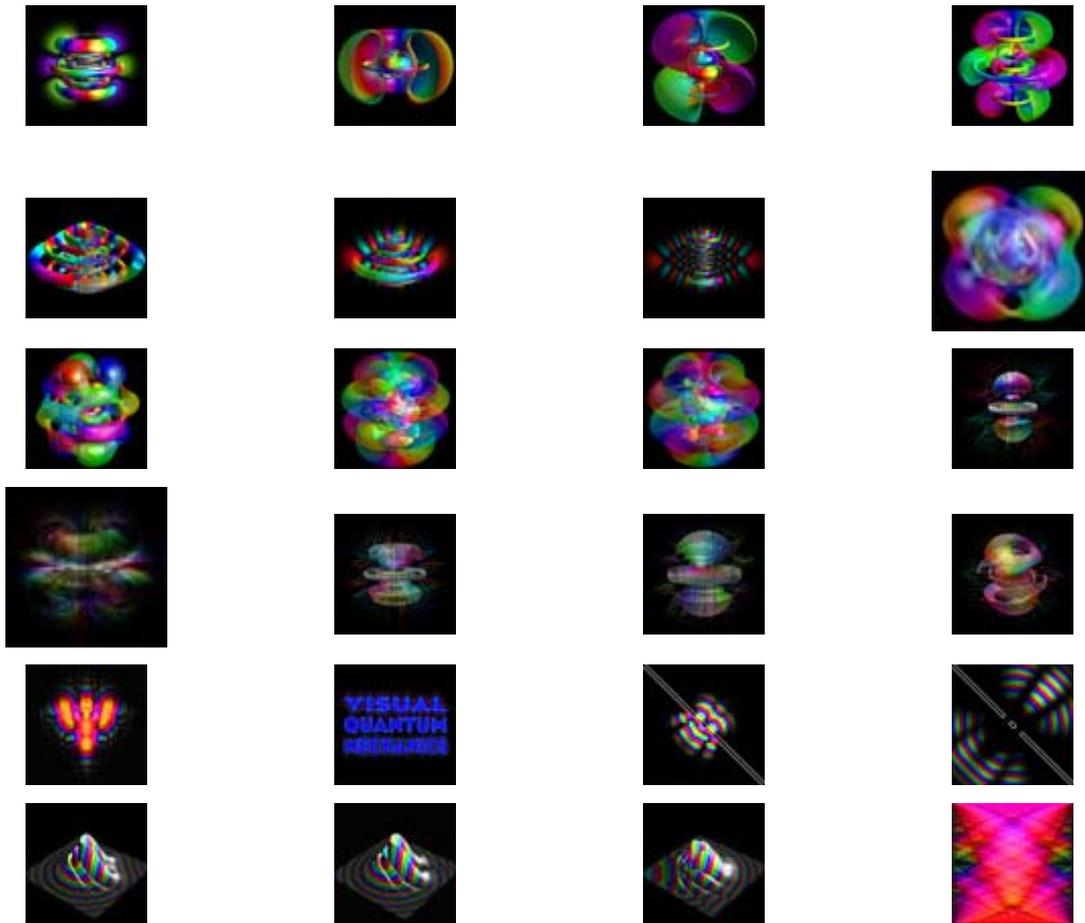
Hier wird nochmals eine Abbildung des Zustandes eines Wasserstoffatoms gezeigt und Links zu einer Sammlung weiterer Abbildungen angegeben.

Inhalt:

Es wird eine Abbildung eines Zustands eines Wasserstoffatoms gezeigt und mit einem Link werden noch weitere Zustände dargestellt

²² <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/atome2.html>

Bild: ²³



Die Ringe im Bild sind die wahrscheinlichen Aufenthaltsorte des Elektrons.

Ein geworfener Tennisball:

Mit diesen drei Bildern werden die Momentaufnahmen einer Wurfparabel eines Teilchens in einem Kraftfeld gezeigt.

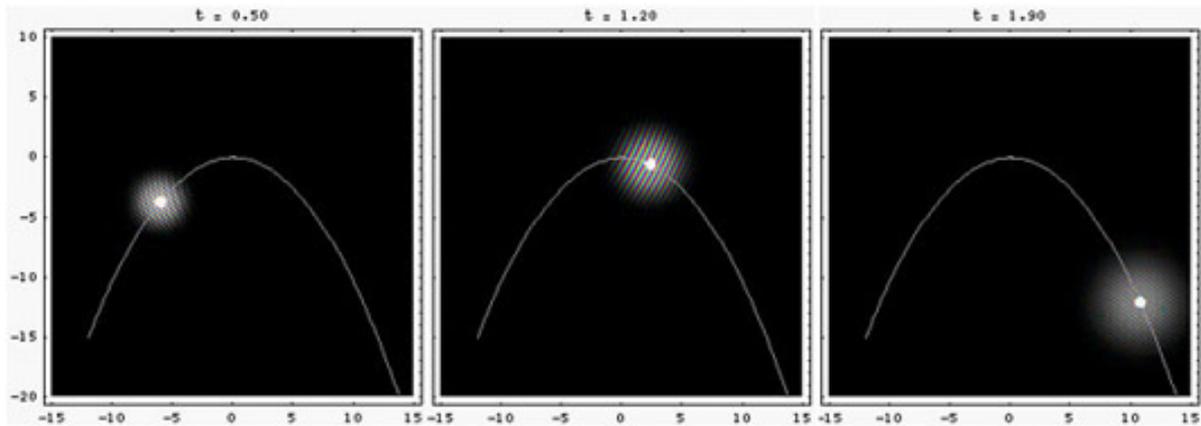
Inhalt:

Der Flug eines Elektrons wird mit der Wurfbahn eines Tennisballs verglichen.

Vom schräg geworfenen Tennisball werden seine jeweilige Energie und die horizontale Bewegung beschrieben.

²³ http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/pages/qm_gallery/index1.html

Bild: ²⁴



Um die „Wurfparabel“ eines Tennisballs nachzuahmen, wird das Elektron durch ein konstantes elektrisches Feld geschickt. Dabei ergibt sich, dass die Bahn die auf den Bildern dargestellt wird, eine Lösung der Schrödingergleichung ist. Die Wolke um das Teilchen gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des quantenmechanischen Teilchens an.

Auch in einem Video wird die Bahn eines Teilchens in einem konstanten Kraftfeld gezeigt.

Die quantenmechanische Wellenfunktion:

Auf dieser Seite werden nochmals die drei Bilder der Wurfparabel gezeigt. Hier ist auch die räumliche Unschärfe zu sehen.

Inhalt:

Die Quantenmechanik gibt keine genauen Auskünfte über Ort und Geschwindigkeit. Es wird erklärt, dass man in den Bildern das Teilchen am wahrscheinlichsten in der Nähe jenes Ortes findet, den es nach der klassischen Mechanik einnehmen müsste. Die Wahrscheinlichkeit für den Aufenthaltsort ist umso höher, je größer die Intensität ist.

Die Quantenmechanik kann nur statistische Aussagen machen. Um eine Vorhersage zu überprüfen, müssen mehrere Experimente durchgeführt werden.

Bei nur einer Messung kann man das Teilchen überall dort finden, wo seine Wellenfunktion ungleich Null ist.

²⁴ <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/wellen1.html>

Die Unschärferelation:

In diesem Abschnitt werden zwei Abbildungen einer Wurfparabel in klassischer und quantenmechanischer Form dargestellt.

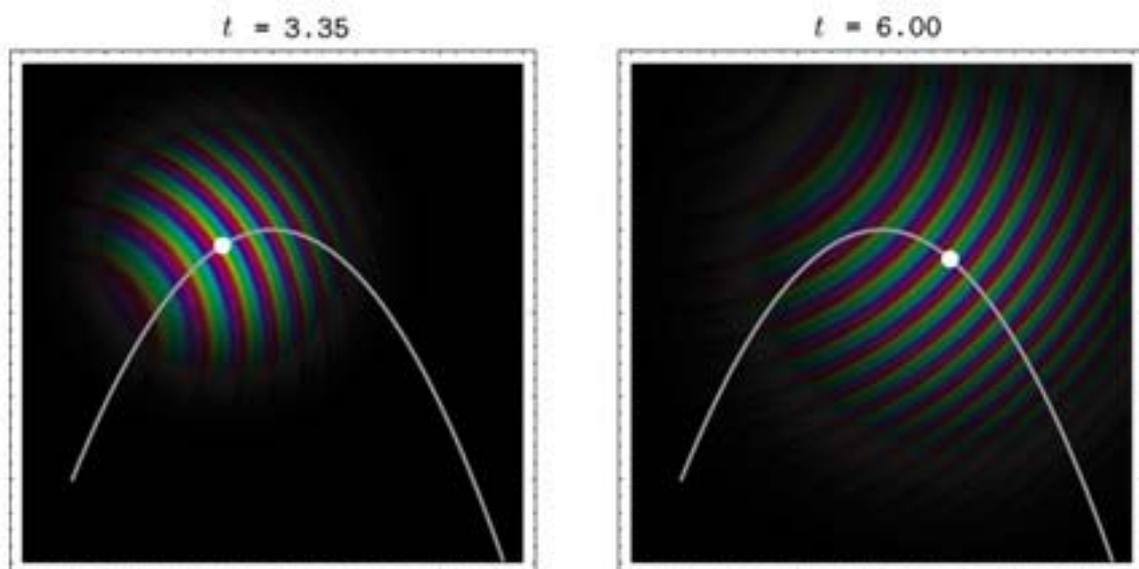
Es ist auch ein Link zu einem Video über die Unschärfe bei einem „Wurf“ angeführt.

Inhalt:

Die Geschwindigkeit und die Richtung der Ausbreitung der Wellenfunktion können nicht genau bestimmt werden. Dadurch wird die Ortsverteilung mit der Zeit ausgeweitet.

Nach der Heisenbergschen Unschärferelation nimmt das Produkt der Unschärfen von Geschwindigkeit und Ort einen minimalen Wert an.

Bild: ²⁵



Die Unschärfe wird größer, wenn man ein kleineres Teilchen oder niedrigere Energien verwendet.

Die Punktförmigkeit eines Elektrons wird angesprochen. Die Wellenfunktion ist nur die räumliche Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit.

²⁵ <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/wellen3.html>

Die Farben der Wellenfunktion:

Hier werden nochmals die beiden Bilder über die klassische und quantenmechanische Wurfparabel gezeigt.

Inhalt:

Elektronen besitzen sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter. Die Abstände der gleichfarbigen Wellenberge beschreiben die durchschnittliche Wellenlänge. Wobei eine kurze Wellenlänge eine hohe kinetische Energie bedeutet und eine lange Wellenlänge eine niedrige kinetische Energie.

Anhand der Bilder wird erklärt, dass die Wellenlänge des Teilchens am Scheitelpunkt am größten und die Geschwindigkeit am kleinsten ist. Die Geschwindigkeit am absteigenden Ast wird immer größer und dadurch die Wellenlänge immer kleiner. Die Wellenamplitude wird durch eine komplexe Zahl beschrieben.

Die Energie und damit die Gefährlichkeit eines Photons hängen von seiner Wellenlänge ab. Das kann man bei der Gammastrahlung, die aus hochfrequenten Photonen besteht, beobachten.

Komplexe Zahlen – ein mathematischer Ausflug:

In diesem Abschnitt wird eine Abbildung gezeigt, in der der Aufbau einer komplexen Zahl mithilfe von Farben dargestellt wird.

Es gibt auch einen Link, wo man mehrere komplexe Funktionen betrachten kann.

Inhalt:

In diesem Kapitel wird der Aufbau von komplexen Zahlen beschrieben. Komplexe Zahlen sind zweidimensional. Sie können durch ihren Betrag, also den Abstand vom Nullpunkt und ihre Phase, dem Winkel zwischen der Zahlengeraden und der Betragslinie, beschrieben werden.

Quantenmechanische Wellenfunktionen besitzen in jedem Punkt des Raumes einen komplexen Zahlenwert. Zur besseren Darstellung werden hier Farben verwendet.

Teilchen und Wellen:

Es wird ein Rastertunnelmikroskopbild eines Kupferkristalls gezeigt, welches zwei Störstellen aufweist.

Zusätzlich gibt es hier zwei Links zu weiterführenden Seiten.

Inhalt:

Max Plank und Albert Einstein beschrieben in ihren Arbeiten den Teilchencharakter von Lichtwellen. Den Lichtstrahlen wird ein Impuls zugesprochen, der von der Wellenlänge abhängt.

Dass die Teilchenbewegungen einen Wellencharakter haben, wurde von Louis de Broglie einige Jahre später erkannt, was dann später zur Schrödingergleichung führte.

Die Elektronenbeugung an Kristallgittern ist ein Beweis für die Wellennatur der Teilchenbewegung.

Ebene Wellen:

Hier wird das Bild einer Lösung der Schrödingergleichung einer unendlich ausgedehnten ebenen Welle dargestellt.

Es ist auch ein Video verlinkt, in dem die Bewegung der ebenen Welle dargestellt wird.

Inhalt:

Eine Welle ist ein zeitlich und räumlich periodischer Vorgang, der durch seine Wellenlänge und Frequenz charakterisiert wird. Laut Definition ist sie unendlich weit ausgedehnt.

Dies wird anhand eines Bildes gezeigt. Die deBroglie-Wellenlänge kann mithilfe gleichfarbiger Streifen bestimmt werden.

Bei solchen Wellen sind nur noch Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit, nicht aber der Standort vorhanden.

Welleneigenschaften:

Es ist ein Bild von zwei Wellen mit verschiedenen Wellenlängen zu sehen. In einem verlinkten Film wird gezeigt, wie sich die beiden Wellenberge wegen ihren unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich schnell bewegen.

Inhalt:

Zuerst wird hier noch einmal erwähnt, dass schnelle Bewegungen mit kurzen Wellenlängen und langsame Bewegungen mit langen Wellenlängen ablaufen. Danach wird noch der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz beziehungsweise zwischen Impuls und Energie beschrieben. Eine kurze Wellenlänge lässt entweder auf eine hohe Geschwindigkeit oder auf eine große Masse schließen. Ein hoher Impuls des Teilchens ergibt eine hohe Energie.

Superpositionsprinzip:

In einem Bild werden Wellen überlagert.

Es gibt einen Link zu einem Film, in dem eine Animation gezeigt wird, in der drei Wellen zu einer Welle überlagert werden.

Inhalt:

Die Schrödingergleichung hat mehrere mögliche Lösungen. Die Überlagerung zweier Lösungen der Schrödingergleichung ergibt wieder eine Lösung dieser Gleichung. Was die Farben betrifft, wird festgehalten, dass sich gleiche Farben summieren und Komplementärfarben einander aufheben.

Interferenz:

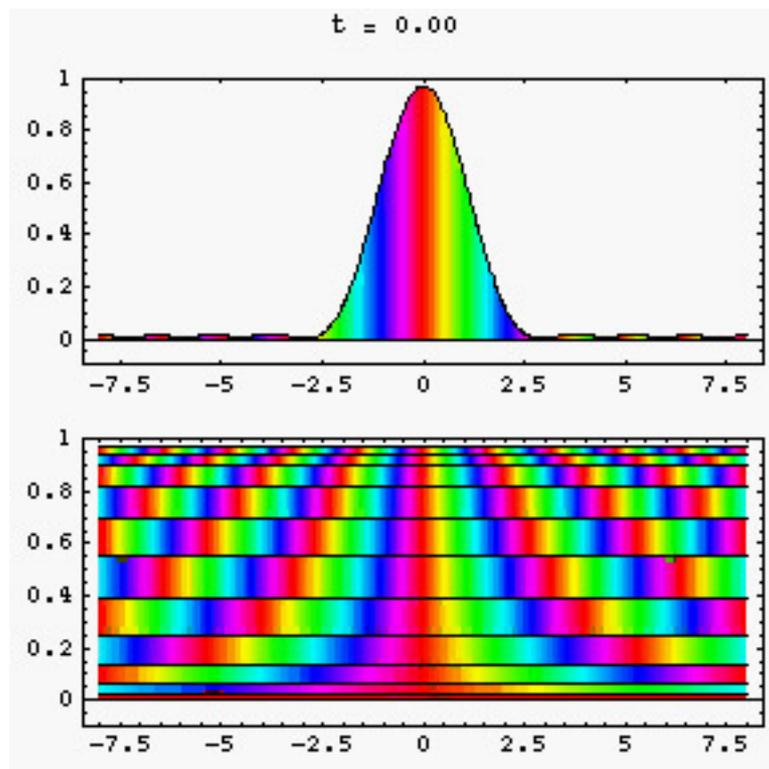
Es werden Bilder von der Überlagerung zweier und mehrerer ebenen Wellen gezeigt, die sich zu lokalisierten Wellenfunktionen überlagern können.

In einem verlinkten Film werden mehrere ebene Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen überlagert und so entsteht ein sich ständig verändernder lokalisierter Wellenzug.

Inhalt:

Die Interferenz ist eine Überlagerung zweier Wellenfunktionen.

Bild: ²⁶



Die Überlagerung der Wellen wird durch eine vektorielle Addition der komplexen Zahlen dargestellt. Es hängt von der Farbe ab, ob sie sich die Amplituden addieren oder subtrahieren. Man kann lokalisierte Wellenfunktionen erzeugen, indem man mehrere ebene Wellen überlagert.

Durch die Herstellung lokalisierter Wellenpakete geht die Information über die Geschwindigkeit verloren.

²⁶ <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/interferenz.html>

Wellenpakete und Unschärferelation:

In diesem Kapitel sind zwei Links zu weiterführenden Seiten angegeben.

Inhalt:

Zur Erzeugung eines lokalisierten Wellenpaketes braucht man unendlich viele ebene Wellen. Diese kann man mit der Fourieranalyse mathematisch untersuchen. Je genauer ein Wellenpaket lokalisiert ist, desto breiter ist die Verteilung der beteiligten Impulse. Das bedeutet: Je genauer der Ort bestimmt ist, desto unschärfer ist der Impuls und umgekehrt, wie es die Heisenbergsche Unschärferelation beschreibt.

Das Phänomen der Unschärfe wird nicht durch die Unfähigkeit bestimmt, die beiden Größen zu messen, sondern dadurch, dass bei genauem Messen einer Größe die andere nicht exakt festgestellt werden kann.

Bewertung:

Diese Internetseite mit ihren 14 Unterseiten gibt eine Möglichkeit einer Zusammenfassung des Lehrstoffkapitels Quantenmechanik.

Sie ist nicht direkt als Unterrichtsmittel geeignet. Teile, wie die eingefügten Videos, können aber in den Unterricht eingebaut werden.

Man könnte aber am Ende des Kapitels Quantenmechanik diese Seite den Schülern als eine etwas andere Darstellungsform zeigen.

Quantenmechanik

<http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenmechanik>

Aufbau:

Die Seite ist in 11 Kapiteln unterteilt. Über ein Inhaltsverzeichnis, das man ausblenden kann, kommt man schnell zu den einzelnen Abschnitten.

Die Seite ist in mehreren verschiedenen Sprachen verfügbar, die am Ende der Seite angeführt sind.

Es sind zwei Bilder eingefügt, von denen eines die Wellenfunktion eines Elektrons in einem Wasserstoffatom zeigt und das andere die d-Orbitale darstellt.

Da die Seite von den Usern ständig aktualisiert wird, ist sie immer auf einem neuen Stand und Fehler werden schnell ausgebessert.

Es gibt auch ein Literaturverzeichnis mit ISBN Nummern zu Büchern, die dieses Thema behandeln.

Design:

Das Design ist sehr einfach gehalten. Es gibt kaum Bilder und keine besondere Farbgestaltung.

Voraussetzungen:

Die Beiträge auf dieser Seite können von jedem User verändert werden. Daher ist es für jemanden, der sich nicht mit der Materie nicht auskennt, schwierig die Themengebiete zu verstehen.

Links:

Auf dieser Seite sind die meisten Fachbegriffe mit entsprechenden Seiten aus der Wikipediadatenbank verlinkt.

Auch ein Link zu einer anderen Quantenmechanikseite „Physik des Monats April“ ist angegeben.

Inhalt:

Die Quantenmechanik ist in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstanden. Sie sich zur Beschreibung von Materie und Energie in kleinen Maßstäben geeignet.

Es werden noch einige andere Bereiche der Quantenphysik benannt, wie zum Beispiel Quantenelektrodynamik und andere Quantenfeldtheorien.

Die Quantenmechanik erklärt Effekte, die in der klassischen Physik nicht berücksichtigt werden, wie zum Beispiel:

- Messbare Observablen können nur diskrete Werte annehmen.
- Die kleinsten Energiesprünge der Observablen werden Quanten genannt.
- Elektromagnetische Wellen nehmen manchmal Teilchencharakter und Teilchen manchmal Wellencharakter an.
- Nach der Unschärferelation können bestimmte Observablenpaare nicht gleichzeitig exakt gemessen werden.

Die Quantenmechanik bezieht sich nicht nur auf kleine Objekte. Ein Grenzfall der Quantenmechanik ist die klassische Mechanik.

Beschreibung der Theorie:

Zustandsfunktion:

Durch Experimente, die am Ende des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden, hat sich herausgestellt, dass die klassische Beschreibung der Welt unzureichend war. In der klassischen Physik ist ein System vollständig durch die Angabe des Ortes und des Impulses seiner Bestandteile beschrieben. In der Quantenmechanik wird die klassische Beschreibung durch eine Zustandsfunktion ersetzt. Diese Zustandsfunktion enthält alle Informationen über das System.

Wellenfunktion/Modell:

Die Zustandsfunktion eines Systems kann als Wellenfunktion bezeichnet werden. Man kann sich aus der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Observablen des Systems berechnen.

Als Beispiel für eine Wellenfunktion werden die Elektronenzustände fester Energien im Wasserstoffatom beschrieben. Aus der Wellenfunktion kann man die Wahrscheinlichkeit für den Aufenthaltsort des Elektrons berechnen.

Die Wellenfunktionen eines Systems sind die Lösungen der das System beschreibenden Schrödingergleichung.

Welleneigenschaften:

Die Quantenmechanik wurde aus dem Grund entwickelt, weil die klassische Beschreibung der Atome nicht mehr ausreichte. Die Teilchen weisen Welleneigenschaften auf, die sich durch Überlagerung zweier Wellenfunktionen ergeben.

In quantenmechanischen Systemen sind Messwerte mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit behaftet und können daher nicht eindeutig bestimmt werden.

Mathematische Formulierung:

John von Neumann beschrieb 1932 ein quantenmechanisches System als Wellenfunktion in einem komplexen Hilbertraum. Eine Zustandsfunktion ist ein Vektor dieses Raumes und jede Observable wird durch einen linearen Operator beschrieben.

Falls ein Operator ein diskretes Spektrum besitzt, nimmt die Observable diese diskreten Eigenwerte an. Nach der Messung befindet sich das System im Eigenvektor zum gemessenen Eigenwert.

Bestimmt man den Aufenthaltsort eines Teilchens, führt man das System in einen neuen Ortszustand über. Damit geht die Information über den vorherigen Zustand verloren.

Philosophische Fragen:

Es werden fünf philosophische Fragen über die Quantenmechanik angesprochen, wie zum Beispiel: „Gibt es in der Natur Zufälle?“ oder „Sind die Gesetze deterministisch?“. Weitere Fragen sind zu den Themen Realität, Verständlichkeit, Messprobleme und die Lokalität gestellt.

Schlüsselexperimente/Gedankenexperimente:

Hier werden Experimente wie das Einstein-Podolsky-Rosen Experiment und Schrödingers Katze erwähnt.

Interpretation:

Es wird davon ausgegangen, dass die Quantentheorie alles beschreiben kann, was es über ein System zu wissen gibt. Die Messvorgänge sind irreduzibel wie es in der Kopenhagener Deutung beschrieben wird.

Es werden auch noch andere Interpretationen wie zum Beispiel die Führungswelleninterpretation oder die Viele-Weltentheorie erwähnt. Diese spricht von mehreren Paralleluniversen, in denen alle Möglichkeiten verwirklicht werden, wodurch das Universum wieder deterministisch wird.

Anwendungen:

Hier werden einige Beispiele gebracht, die durch die Quantenmechanik erklärt werden können wie zum Beispiel Transistoren, Dioden, Laser oder auch Quantencomputer und Quantenkryptographie.

Erweiterungen:

Die Quantenfeldtheorie, die Diracgleichung und die Klein-Gordon-Gleichung sind wichtige Erweiterungen der Quantentheorie.

Geschichte:

Die Anwendung der klassischen Gesetze auf mikroskopische Systeme kann zu Widersprüchen und unsinnigen Aussagen führen.

Dabei geht man darauf ein, dass zuerst versucht wurde das Spektrum der elektromagnetischen Welle eines schwarzen Körpers herzuleiten.

Quantifizierung der Theorie:

Der Beginn der Quantentheorie als exakte Theorie liegt in der Untersuchung der Spektrallinien des Wasserstoffatoms. In der Quantenmechanik wurden Variablen durch Operatoren ersetzt.

Die Schrödingergleichung beschreibt die möglichen Zustände und die zeitliche Entwicklung eines Systems.

Weitere Entwicklungen:

Hier werden noch einige andere Aspekte der Quantenmechanik besprochen, wie zum Beispiel der Welle Teilchen Dualismus, die Quantenfeldtheorie und die Viel-Welten Theorie.

Einige Zitate:

Abschließend werden noch einige Zitate von Begründern der Quantenmechanik angeführt.

Bewertung:

Da die Beiträge jederzeit von jedem bearbeitet und verändert werden können, sind sie nicht immer leicht zu verstehen. Durch diese ständigen Veränderungen sind sie nicht besonders für den Unterricht geeignet, da man nie weiß, welche Informationen einen erwarten. Auf Grund der Komplexität einiger Erklärungen wird es günstig sein, einen Auszug dieser Seite zu erstellen, wo nur jene Inhalte vorkommen, die in den Lehrstoff passen.

Gesamtbeurteilung

Generell kann man sagen, dass die dargebotenen Internetseiten nicht direkt als e-learning Seiten konzipiert sind.

Meiner Meinung nach ist der Vortrag des Lehrstoffs auch nicht durch Medien zu ersetzen, obwohl man sie im Unterricht bewusst einsetzen und einbinden muss. Dazu gehört auch die Verwendung des Internets.

Gerade im Kapitel Quantenmechanik, wo nur wenige Versuche in der Schule direkt durchgeführt werden können, ist der gezielte Einsatz von Internetseiten von Vorteil. Es sollten aber jeweils nur Teile einer Internetseite verwendet werden, die den Vortrag der Lehrkraft unterstützen.

Der Unterricht Quantenmechanik sollte aus Inhalten des verwendeten Buches, Teilen von Internetseiten und Versuchen zusammengestellt werden. Das ist wahrscheinlich für die Schülerinnen und Schüler der beste Weg Quantenmechanik zu verstehen.

Abstract

Meine Aufgabe bestand darin, im Internet nach Quantenmechanikseiten zu suchen und diese dahingehend zu bewerten, ob sie für den Unterricht verwendbar sind.

In meiner Arbeit habe ich mit einer Zeittafel über die geschichtliche Entwicklung der Quantenmechanik begonnen.

Nach einem kurzen Exkurs in den Lehrplan ging ich auf die Methodenwahl zur Übermittlung des Lehrstoffes ein.

Anschließend habe ich meine Auswahl der Internetseiten erläutert und über jede Seite eine kurze Zusammenfassung angeführt.

Im Hauptteil beschrieb ich die einzelnen Internetseiten genauer und fügte meine Meinung über die Inhalte und die Stoffdarbietung an.

Quantentheorie:

Die Hauptseite befasst sich mit mehreren Bereichen der Wissenschaft. Neben der Physik gibt es auch Beiträge über Philosophie und Evolution. Im Physikteil sind Beiträge über Quantenmechanik, Relativitätstheorie, Kosmologie und klassische Physik vorhanden.

milq:

Die Startseite ist in 13 Unterkapitel unterteilt. Sie ist speziell für Lehrer gedacht, die das Thema Quantenmechanik in der Schule vortragen wollen. Für Schüler ist es schwierig sich alleine zurecht zu finden. Mit etwas Unterstützung durch den Lehrer sollten aber die Probleme lösbar sein, da mehrere Grafiken und Animationen den Stoff leichter verständlich machen.

Einführung in Quantenmechanik:

Es gibt 6 Unterkapitel. Zur Auflockerung des Textes sind wieder Grafiken und Animationen in den Text eingefügt. Dieser Text ist populärwissenschaftlich verfasst und daher leicht verständlich.

Quanten Gickse:

Hier gibt es einen klassischen und einen quantenmechanischen Teil. Es können vom Benutzer selbst einige Variablen verändert werden. Dadurch werden die Gickse auf eine bestimmte Observable präpariert. Um diese Seite zu verstehen braucht man keine besonderen Vorkenntnisse.

Quantenmechanik online:

Zur besseren Veranschaulichung gibt es in einigen der 14 Kapiteln Videos. Diese Seite ist aufbauend strukturiert.

Quantenmechanik Wikipedia:

Da auf diesen Seiten die Einträge von den Usern ständig verändert werden können, ist es schwierig damit zu arbeiten. Man kann nie wissen, wie sie gerade aussieht. Der Vorteil ist, dass die Seite immer auf dem aktuellen Stand ist.

Zum Abschluss fügte ich noch eine Gesamtbeurteilung an.

Literaturverzeichnis

Sexl – Kühnelt – Stadler – Jakesch Physik 4

<http://homepage.hispeed.ch/philipp.wehrli/Physik/Quantentheorie/quantentheorie.html>

<http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/>

<http://wwwcs.upb.de/cs/ag-madh/WWW/ziegler/qm.html>

<http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Quantentheorie/gicks/?anzeige=augen>

<http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/qm-online.html>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenmechanik>

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Lebenslauf

Franz Spiesmeier

[adr] Sportplatzstrasse 84
A-3872 Amaliendorf
Lackierergasse 7/5
A-1090 Wien
[tel] +43-(0)664/4423050
[e-mail] franz.spiesmeier@gmx.at

PERSÖNLICHE DATEN **Geburtsdatum:** 15.September 1978
Geburtsort: Gmünd, Niederösterreich
Nationalität: Österreich
Familienstand: ledig

AUSBILDUNG **Volksschule Amaliendorf/Aalfang** 1986 bis 1989

Gymnasium BG und BRG Gmünd NÖ 1989 bis 1997
Realgymnasialzweig, Vertiefung Physik, Biologie und Chemie

Matura am BG und BRG Gmünd im Juni 1997

Lehramtsstudium in Physik und Mathematik an der
Universität Wien seit Oktober 1998

SPRACHEN Deutsch
 Englisch
 Russisch

PRÄSENZDIENST abgeleistet beim **Roten Kreuz Gmünd Landesverband**
Niederösterreich, Oktober 1997 bis September 1998

TÄTIGKEITEN UND AUSBILDUNGEN

Innerhalb des Roten Kreuzes:

- **Gruppenkommandantenkurs 2001**
- **Gruppenkommandant seit 2001**
- **Berufsmodul 2002**
- **Vertretungen im RKT (Rettungs- und Krankentransport) Dienst 2001 bis 2004**
- **Gruppenleiter Grundkurs 2002**
Betreuer / Stv Gruppenleiter einer Rot Kreuz
Jugendgruppe 2001 bis 2007
- **Basisseminar "Stabsarbeit" 2003**
- **Ausbildung zum Praxisanleiter 2003**

BERUFLICHE TÄTIGKEIT

- Vertretungslehrer in der AHS Heustadelgasse Februar bis April 2008
- Seit September 2008 Vertretungslehrer am Konrad Lorenz Gymnasium in Gänserndorf.