

Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik¹

Rainer Müller

1 Ausgangspunkte

Ohne Zweifel gehört die Quantenphysik zu den schwierigeren Bereichen unseres Faches. Beim Versuch, diese Schwierigkeit genauer zu bestimmen, läuft man allerdings sofort in eine Sackgasse: (1) Die Quantenphysik ist mit den Mitteln der Schule experimentell schlecht zugänglich? Sofort akzeptiert, aber darin liegt das eigentliche Problem wohl nicht. (2) Die Quantenphysik ist geheimnisvoll, niemand versteht sie (höchstens Zeilinger und der Dalai Lama)? In der populärwissenschaftlichen Literatur mag das so erscheinen. Was man dagegen tun kann, soll im Verlauf dieses Artikels gezeigt werden. (3) Die Quantenphysik, so wie sie an den Universitäten gelehrt wird, ist mathematisch kompliziert. Das macht es an der Schule unmöglich, „richtige“ Quantenphysik zu unterrichten? Das ist nicht richtig. Die Maxwell-Gleichungen sind mathematisch *viel* komplizierter als die Schrödinger-Gleichung. Trotzdem ist es in einem historischen Prozess im Fall der Elektrizitätslehre gelungen, die Inhalte so zu elementarisieren, dass ihre Grundlagen im Unterricht nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ vermittelt werden.

Der Vergleich zwischen Quantenphysik und Elektrizitätslehre ist ganz hilfreich, um zu erkennen, in welche Richtung eine fruchtbare Entwicklung des Quantenphysik-Unterrichts zu erwarten ist. In der Elektrizitätslehre ist es gelungen, einige Grundzüge zu identifizieren und für den Unterricht zu elementarisieren, die für das Verständnis des Ganzen als „wesentlich“ angesehen werden können. Die entsprechenden Begriffe sind uns so sehr in Fleisch und Blut übergegangen, dass man kaum mehr gewahr werden mag, dass es sich um Setzungen handelt: Die Begriffe von Stromstärke und Spannung, statische Phänomene und stationäre Stromkreise, magnetische Wirkungen und Induktion, Existenz und Eigenschaften elektromagnetischer Wellen.

In der Quantenphysik dagegen hat ein solcher Klärungsprozess offenbar nie stattgefunden. Das in den Lehrplänen vorgeschlagene Curriculum war oft am historischen Nachvollzug der Entdeckungsgeschichte orientiert. In der Regel fand und findet man aber eine Degenerationsform davon: Die traditionellen Inhalte des Unterrichts werden allein durch die Existenz bewährter (Abitur-) Aufgaben bestimmt. Fotoeffekt, Compton-Effekt, Franck-Hertz-Versuch und Bohrsches Atommodell mögen für die Deutung der Quantenphysik einige Nützlichkeit haben: In der Regel wird aber – gerechnet, nicht verstanden. (Der Hinweis auf die experimentelle Zugänglichkeit ist hier nicht berechtigt: Wie oft werden die Experimente zur h -Bestimmung mit der Gegenfeld-Methode oder zum Compton-Effekt im Unterricht tatsächlich *durchgeführt*?)

¹ erschienen in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 6/57 (2008), S. 19.

2 Ziele des Quantenphysik-Unterrichts

Dieser notwendige, aber unterbliebene Klärungsprozess war einer der Ausgangspunkte bei der Entwicklung des Münchener Unterrichtskonzepts. Es sollte keine Verbesserung durch kleine Korrekturen versucht werden, sondern es ging darum, in einem „großen Wurf“ das Gebiet neu zu gliedern und aus einem veränderten Blickwinkel für den Unterricht zu erschließen. Die Ziele, die sich im Verlauf dieser Neugliederung (durch Wiesner, Engelhardt [1], Müller und andere) ergaben, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen [2]:

- **Gegensatz zur klassischen Physik.** Es werden die Aspekte der Quantenphysik herausgestellt, die gegenüber der klassischen Physik das „ganz Neue“ darstellen.
- **Bereitstellen klarer Begriffe.** Die die oben angesprochene Mystifizierung der Quantenphysik soll im Ansatz verhindert werden. Dazu werden klare Begriffe zur Verfügung gestellt, die es den Schülerinnen und Schülern erlauben, die oft kontraintuitiven und deutungsbedürftigen Phänomene der Quantenphysik in ein kohärentes kognitives Bild zu integrieren.
- **Hervorheben der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation.** Die probabilistischen Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik werden als ein zentraler Zug von Anfang an herausgestellt (insbesondere bei der Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation).
- **Nichtbesitzen von Eigenschaften und quantenmechanischer Messprozess.** Ein wesentlicher Unterschied zur klassischen Physik ist, dass Quantenobjekte in Zustände gebracht werden können, in denen sie klassisch wohldefinierte Eigenschaften wie „Ort“, „Bahn“ und „Energie“ nicht besitzen. Damit im Zusammenhang steht die besondere Rolle des quantenmechanischen Messprozesses: In der Quantenmechanik besteht ein Unterschied zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen“. Dies findet seinen Ausdruck z. B. in der Zustandsreduktion nach einer Messung und wird illustriert durch solch paradoxe Situationen wie Schrödingers Katze.

3 Schülervorstellungen

Wie in diesem Heft durchgängig deutlich wird, ist es erfolgversprechend, den Unterricht an den Lernvoraussetzungen der Schüler zu orientieren. Die fachdidaktische Forschung hat in jahrelanger Detailarbeit einen großen Fundus an Erkenntnissen über Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zusammengetragen[2]. Im Vergleich zur Elektrizitätslehre steht die Quantenphysik in dieser Hinsicht nicht schlecht da: Die Schülervorstellungen, mit denen man sich im Unterricht auseinandersetzen muss, sind eindeutig, klar ausgeprägt und nachvollziehbar. Es ist vollkommen einleuchtend, dass Schülerinnen und Schüler sich ein Elektron im Atom als klassisches Teilchen vorstellen, dem sie einen wohldefinierten Ort zuschreiben. Dieser Umstand erleichtert die Auseinandersetzung mit den Schülervorstellungen; in militärischer Sprechweise steht man dem Gegner (den Schülervorstellungen, nicht den Schülern) in offener Feldschlacht gegenüber.

Im Gegensatz dazu steht der „Partisanenkrieg“ in der Elektrizitätslehre, in dem man an allen Ecken und Enden mit dem Spannungsbegriff kämpft und dabei immer neue Varianten kennenlernt, ihn trotzdem nicht zu verstehen.

4 Wesenszüge der Quantenphysik

Im Verlauf der Entwicklung des Unterrichtskonzepts wurden die oben formulierten Ziele inhaltlich präzisiert. Es gelang, vier kurze, prägnante „Merksätzen“ aufzustellen, in denen die grundlegenden Züge der Quantenphysik qualitativ enthalten sind. Im gleichnamigen Buch von Küblbeck und Müller [4] werden die folgenden „Wesenszüge der Quantenphysik“ identifiziert, die unten noch ausführlicher erläutert werden:

- Statistische Vorhersagbarkeit
- Fähigkeit zur Interferenz
- Eindeutige Messergebnisse
- Komplementarität

Nach meiner Überzeugung sind die vier Wesenszüge *weiterführend* und *vollständig*. Sie sind weiterführend, weil nichts davon zurückgenommen werden muss, selbst wenn man zu den kompliziertesten Sachverhalten der Quantenmechanik vorstößt. Sie sind vollständig, weil nichts *wesentlich* Neues hinzukommt, wie tief man auch immer vordringt. Dies gilt natürlich nur *in nuce*, etwa insoweit man sagen kann, man habe die klassische Mechanik vollständig verstanden, wenn man den Inhalt der Newtonschen Gesetze begriffen hat.



Abbildung 1: In der klassischen Mechanik: Zielen hilft

5 Wesenszug 1: Statistische Vorhersagbarkeit

Die klassische Mechanik ist *deterministisch*. Wenn man Pfeil mit der richtigen Geschwindigkeit und dem richtigen Winkel abschießt, kann man sicher sein, dass er ins Ziel trifft (Abbildung 1). Zwei Pfeile mit identischen Anfangsbedingungen werden identische Bahnen durchlaufen (das Kunststück von Robin Hood).

In der Quantenmechanik ist das anders (Abbildung 2). Betrachtet man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen (z. B. mit dem Simulationsprogramm, das im Artikel von Schorn und Wiesner beschrieben wird), so stellt man fest: *Der Ort, an dem das nächste Elektron nachgewiesen wird, lässt sich nicht vorhersagen*. Während in der klassischen Mechanik der Ausgang von Experimenten grundsätzlich determiniert ist, ist bei quantenphysikalischen Ereignissen der Ausgang prinzipiell vom Zufall bestimmt (abgesehen von den speziellen Fällen mit Wahrscheinlichkeit 1).

Zielen nützt nichts: Es ist nicht möglich, ein Elektron so zu präparieren, dass es an einer vorher bestimmten Stelle auf dem Schirm landet. Es handelt sich hierbei nicht um eine unzureichende Kenntnis der Anfangsbedingungen, sondern um eine prinzipielle Grenze der Vorhersagbarkeit.

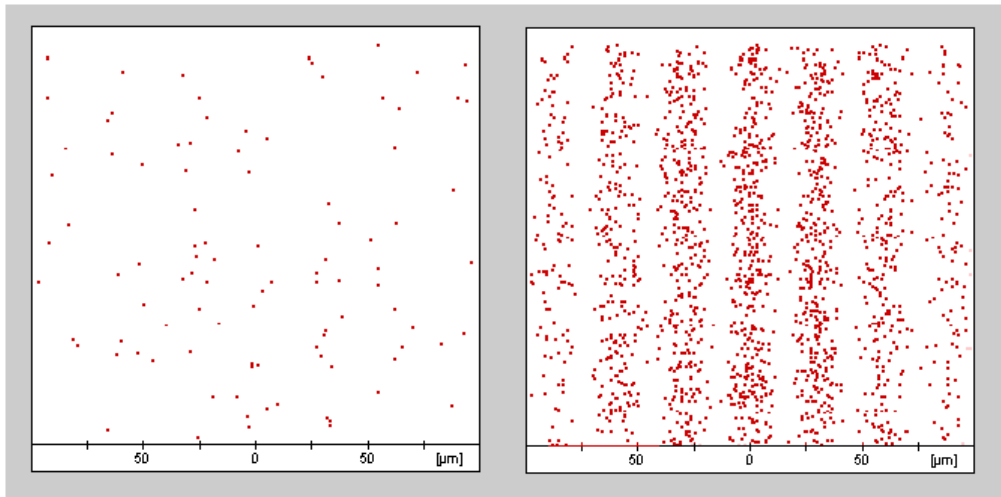


Abbildung 2: Der Auftreffort des nächsten Elektrons lässt sich nicht vorhersagen

Bedeutet dieses Ergebnis, dass nun die Vorhersagbarkeit – einer der Grundpfeiler der Physik – zu Grabe getragen werden muss? Nein, denn es lassen sich reproduzierbare statistische Vorhersagen formulieren: Jedesmal, wenn man den Versuch mit *vielen* Elektronen unter gleichen Bedingungen wiederholt, findet man das gleiche Muster auf dem Schirm. Offenbar kann man eine Aussage darüber machen, wie wahrscheinlich die Elektronen in den verschiedenen Bereichen nachgewiesen werden. Für Quantenobjekte gelten *statistische Gesetzmäßigkeiten*.

Wesenszug 1: „Statistische Vorhersagbarkeit“:

In der Quantenphysik können Einzelereignisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden.

Bei vielen Wiederholungen ergibt sich jedoch eine Verteilung, die – bis auf stochastische Schwankungen – reproduzierbar ist.

Damit ist der vielleicht wichtigste Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik ausgesprochen. Auch wenn die Vorhersagen der Quantenmechanik statistischer Natur sind, handelt es sich trotzdem um streng gültige Gesetzmäßigkeiten. Sie legen nicht das Resultat von Einzelereignissen fest (z. B. den Ort, an dem ein einzelnes Elektron gefunden wird), sondern sie beschreiben eine ganze Serie von Experimenten mit identisch präparierten Quantenobjekten, wo sie Vorhersagen für die reproduzierbaren Häufigkeitsverteilungen der Messwerte machen.

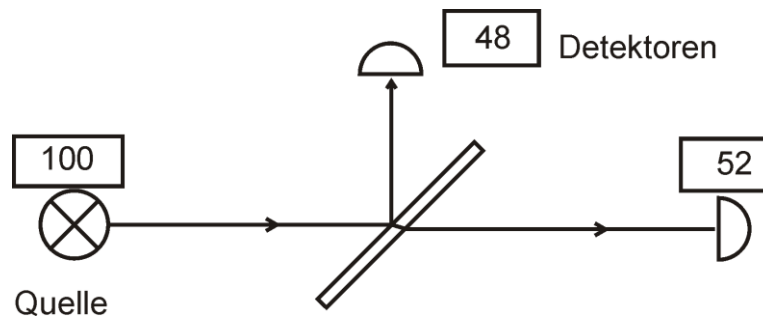


Abbildung 3: Ein Beispiel für das statistische Verhalten: Einzelne Photonen an einem Strahlteiler

Ein Beispiel für das statistische Verhalten von Quantenobjekten ist das Verhalten einzelner Photonen an einem Strahlteiler (einer schräggestellten Glasplatte, Abbildung 3). Beim Durchführen des Experiments mit einzelnen Photonen lässt sich nicht vorhersagen, von welchem der beiden Detektoren das nächste Photon registriert wird. Wohl aber lässt sich die relative Häufigkeit vieler durchgelassener Photonen vorhersagen.

Ein weiteres Beispiel, mit dem sich ein Bezug zur Kernphysik herstellen lässt, ist der Kernzerfall. Ob ein einzelner radioaktiver Atomkern innerhalb der nächsten Stunde zerfällt, können wir nicht vorhersagen. Wir können aber den Bruchteil sehr vieler Kerne vorhersagen, der innerhalb der nächsten Stunde zerfällt.

6 Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Im Doppelspaltexperiment (Abbildung 2) stellt man fest: Obwohl einzelne Quantenobjekte stets nur an einem Ort nachgewiesen werden, bilden ihre Auftreffpunkte nach vielen Wiederholungen ein Interferenzmuster.

Es gibt eine große Anzahl von Quantenexperimenten, die solche Interferenzmuster zeigen (für eine Übersicht s. [4]). Diese werden auch dann beobachtet, wenn sich immer nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Anordnung befindet und eine gegenseitige Wechselwirkung daher ausgeschlossen ist. Dirac drückte es so aus: Jedes Photon interferiert nur mit sich selbst.

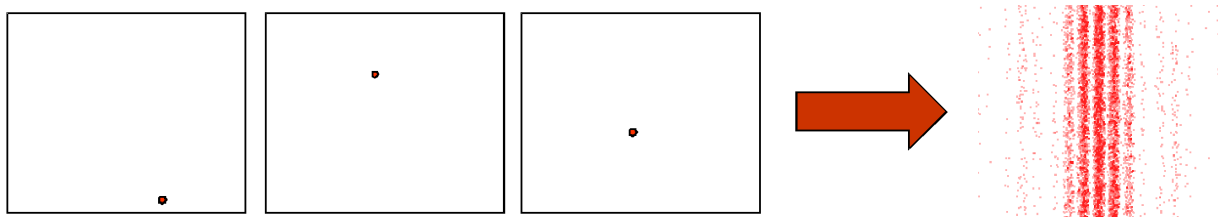


Abbildung 4: Aus vielen Einzelereignissen entsteht ein Interferenzmuster

Man kann eine ganz plastische Veranschaulichung davon geben: Eine Organisation verschickt identische Baupläne für ein Doppelspalt-Interferenzexperiment an viele Labore in der ganzen Welt. Die Physiker in den Laboren bauen die Apparatur nach den Bauplänen auf und führen mit ihren gleichartigen Apparaturen ein Experiment durch – jeder nur mit *einem einzigen* Elektron. Den Nachweisort dieses Elektrons trägt jeder auf einer Overheadfolie ein (Abbildung 4 links). Bei einer Konferenz kommen alle Teilnehmer zusammen, jeder mit einer

Folie, auf der sich ein Punkt befindet. Sie legen ihre Folien auf dem Projektor übereinander. Es ergibt sich – das Doppelspalt-Interferenzmuster (Abbildung 4 rechts).

Wesenszug 2: "Fähigkeit zur Interferenz"

Auch einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen. Voraussetzung ist, dass es für das Eintreten des gleichen Versuchsergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.

7 Ortseigenschaft von Elektronen

Wann immer sich in einem quantenphysikalischen Experiment Interferenz zeigt, gibt es für das Eintreten eines bestimmten Versuchsergebnisses *mehrere im klassischen Teilchenbild denkbare Möglichkeiten*. Im Beispiel des Doppelspalts wäre das Versuchsergebnis die Detektion am Schirmpunkt X. Es gibt zwei klassisch denkbare Möglichkeiten, wie das Versuchsergebnis eintreten kann: das Elektron kann durch den linken Spalt (Möglichkeit 1) oder durch den rechten Spalt (Möglichkeit 2) zum Schirmpunkt X gelangen.

In der Quantenphysik wird keine der beiden klassisch denkbaren Möglichkeiten tatsächlich realisiert. Wie im Artikel von Schorn und Wiesner (in diesem Heft) beschrieben wird, kann man am Doppelspaltexperiment argumentieren: Die Annahme, man könne einem Elektron einen Spalt zuschreiben, durch den es zum Schirm gelangt, führt im Licht der experimentellen Ergebnisse in innere Widersprüche. In der Quantenphysik darf man sich also ein Elektron nicht mehr unbedingt als lokalisiertes Objekt vorstellen

Diese fundamentale Erkenntnis hat wichtige Konsequenzen für unsere Vorstellung von Atomen. Es fällt im Unterricht üblicherweise schwer, das Bohrsche Atommodell argumentativ zu überwinden. Mehr als die bloße Mitteilung: „Tatsächlich laufen die Elektronen nicht auf bestimmten Bahnen um den Kern“ lässt sich meist nicht erreichen.

Mit dem Doppelspaltexperiment lässt sich eine für die Schüler nachvollziehbare *Begründung* dafür geben, dass man Elektronen im Allgemeinen keine klassische Bahn (und auch keine Eigenschaft „Ort“) zuschreiben darf.

8 Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

Die Aussage, dass man einem Elektron im Doppelspaltexperiment die Eigenschaft „Ort“ nicht zuschreiben kann, zieht sofort die folgende Frage nach sich: Den Ort des Elektrons kann man ja messen. Was passiert bei einer Ortsmessung, wenn das gemessene Elektron in einem Zustand ist, in dem man ihm die Eigenschaft Ort gar nicht zuschreiben kann?

Diese Frage wirft das wichtige Thema des **Messprozesses** in der Quantenmechanik auf. Eine Ortsmessung an den Elektronen im Doppelspaltexperiment kann man mit dem erwähnten Simulationsprogramm visualisieren. Der Bereich hinter den Spalten wird mit einer Lichtquelle ausgeleuchtet (Abbildung 5). Das Licht der Lichtquelle trifft ein Elektron und wird von ihm gestreut. Wenn es in unser Auge gelangt, sehen wir das gestreute Licht und haben damit eine Ortsmessung durchgeführt.

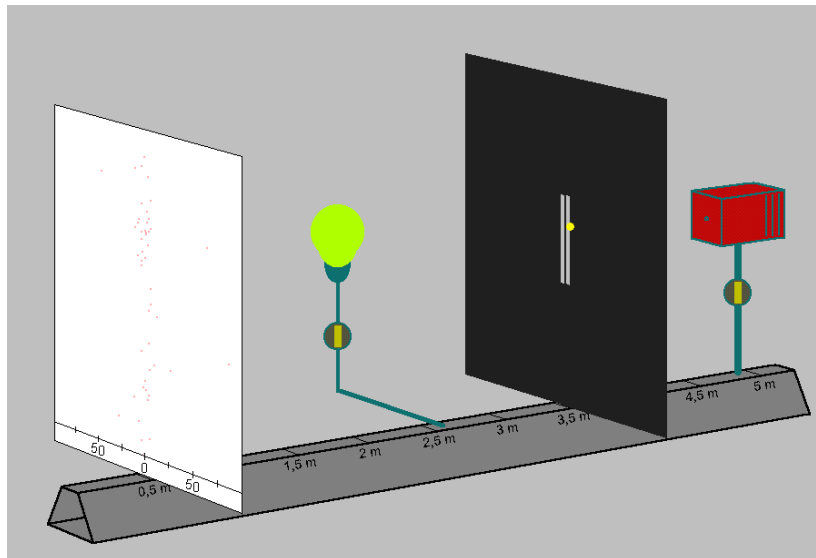


Abbildung 5: Bei einer Ortsmessung wird das Elektron an einem bestimmten Ort gefunden

Im Simulationsprogramm zeigt sich: Für jedes einzelne Elektron, das die Spalte passiert, sieht man einen Lichtblitz an einer ganz bestimmten Stelle (Abbildung 5). Das bedeutet: Bei einer Ortsmessung findet man jedes Elektron an einem wohldefinierten Ort (hinter einem der beiden Spalte). Die Ortsmessung hat ein eindeutiges Ergebnis, auch wenn die Elektronen vor der Messung in einem Zustand waren, in dem sie die Eigenschaft Ort gar nicht besaßen. Eine Messung an einem quantenmechanischen Objekt unterscheidet sich in dieser Hinsicht von Messungen in der klassischen Physik: Während in der klassischen Physik durch eine Messung eine schon vorher festliegende Eigenschaft nur festgestellt wird, hat eine quantenmechanische Messung aktiven Charakter. Das gemessene System wird „gezwungen“, sich für einen der möglichen Messwerte zu „entscheiden“. Dies ist ein genereller Zug von Messungen in der Quantenmechanik. Wenn an einem Quantenobjekt eine Messung gemacht wird, so ist das Ergebnis bezüglich der gemessenen Variablen stets eindeutig.

Wesenszug 3: „Eindeutige Messergebnisse“

Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt vor der Messung in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist.

In der Quantenmechanik macht es einen Unterschied, ob ein Quantenobjekt eine Eigenschaft besitzt oder ob man an ihm eine Eigenschaft misst. Ein Quantenobjekt muss eine bestimmte Eigenschaft (wie den Ort) nicht unbedingt besitzen. Führt man eine Messung durch, findet man dagegen immer einen Messwert. Aus der Tatsache, dass sich bei einer Messung des Ortes ein bestimmter Wert ergeben hat, darf man also keineswegs schließen, dass das Quantenobjekt diese Eigenschaft vorher aufgewiesen hat.

Pascual Jordan formulierte dies so: „Beobachtungen stören nicht nur, was in einem System gemessen wird, sie erzeugen es. Bei einer Ortsmessung wird das Elektron zu einer Entscheidung gezwungen. Wir zwingen es an einen bestimmten Ort, vorher war es nicht hier, nicht dort, es hatte sich für keinen Ort entschieden.“

9 Wesenszug 4: Komplementarität

Auch den vierten Wesenszug kann man mit der gleichen Anordnung im Simulationsprogramm untersuchen. Bei der Ortsmessung an den Spalten haben wir jedes Elektron hinter genau einem der beiden Spalte gefunden. Wenn wir das Experiment mit vielen Elektronen wiederholen und uns anschauen, welche Verteilung sich auf dem Schirm ergibt, stellen wir fest (Abb. 9): Statt des Interferenzmusters ergibt sich dies mal eine strukturlose Verteilung (die Summe der beiden Einzelspalt-Verteilungen). Dadurch, dass wir das Elektron gezwungen haben, sich für einen der beiden Spalte zu entscheiden, haben wir verhindert, dass ein Interferenzmuster auf dem Schirm entsteht.

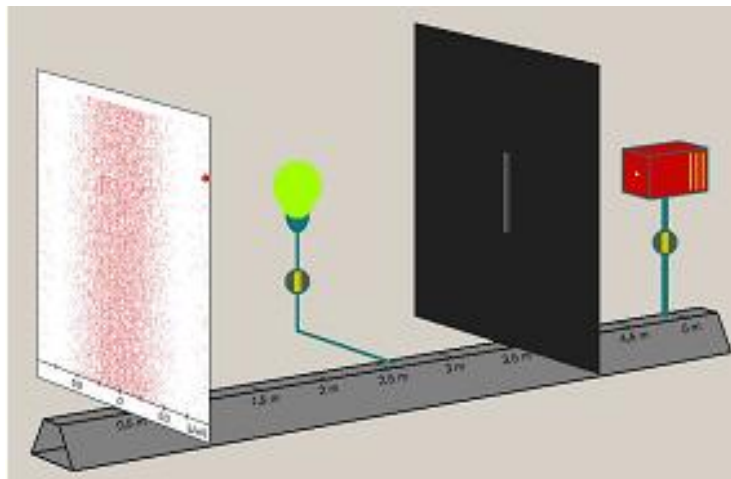


Abbildung 6: Führt man eine Ortsmessung durch, ergibt sich kein Interferenzmuster

Ortseigenschaft und Interferenzmuster sind nicht gleichzeitig realisierbar, sondern schließen sich gegenseitig aus. Dies ist ein Spezialfall eines allgemeinen Prinzips, das man nach Niels Bohr *Komplementarität* nennt.

Man kann eine allgemeine Regel formulieren, wann Quantenobjekte trotz mehrerer klassisch denkbarer Möglichkeiten nicht zu einem Interferenzmuster beitragen: Dies ist dann der Fall, wenn das Experiment – zum Zeitpunkt der Detektion dieser Quantenobjekte auf dem Schirm – eine Information enthält, die man eindeutig einer der klassisch denkbaren Möglichkeiten zuordnen kann. In unserem Beispiel sind die klassisch denkbaren Möglichkeiten das Durchqueren des linken oder des rechten Spaltes. Die Information über diese beiden Möglichkeiten wird von den gestreuten Photonen getragen. Wir können sehen, ob das Photon, das in unser Auge fällt, vom linken oder vom rechten Spalt kommt.

Oft sagt man auch kurz: Ein Interferenzmuster kann nicht beobachtet werden, wenn die klassisch denkbaren Möglichkeiten unterscheidbar sind. Unterscheidbar heißt, dass eine Zuordnung im obigen Sinne möglich ist.

Wesenszug 4: „Komplementarität“

Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Möglichkeiten schließen sich aus.

Der Umkehrschluss gilt nicht. Wenn keine Zuordnung möglich ist, muss nicht automatisch ein Interferenzmuster auftreten. Z. B. kann das Interferenzmuster ausbleiben, wenn die Werte für die Geschwindigkeiten der Quantenobjekte zu stark streuen.

10 Gliederung und Inhalte des Unterrichtsgangs

Die Wesenszüge gliedern den Themenbereich der Quantenphysik, sie helfen bei der Orientierung und sie erlauben es, einzelne Quantenphänomene auf der Grundlage übergeordneter Gesetzmäßigkeiten zu verstehen. Eine Aussage über den Inhalt und die Struktur des Unterrichts enthalten sie noch nicht. Die konkrete Ausgestaltung des Kurses muss in einem weiteren Schritt erfolgen.

Die folgende Darstellung des Münchener Unterrichtskonzeptes zur Quantenphysik kann nur einen kursorischen Überblick vermitteln. Eine ausführliche Darstellung des Unterrichtsgangs findet sich in [5]. Der vollständige Lehrtext ist als etwa 120seitiges Manuskript auf der Seite der Lehrerfortbildung *milq* herunterladbar [6]. Dort sind auch die hier erwähnten Simulationsprogramme frei erhältlich. Eine weitere Umsetzung des Unterrichtskonzeptes findet man im Oberstufenband der Kuhn-Schulbuchreihe [7].



Abbildung 7: Gliederung des Basiskurses

Das Unterrichtskonzept gliedert sich in einen **qualitativen Basiskurs** und einen **quantitativen Aufbaukurs** (der sich hauptsächlich an Leistungskurse richtet). Im Basiskurs werden die Wesenszüge mit weitgehend qualitativen Argumenten erarbeitet.

Der Basiskurs setzt sich aus zwei Teilen zusammen, denn es erschien sinnvoll, die doch recht komplexen Sachverhalte in einem spiralartigen Aufbau in zwei Schritten zu erarbeiten (Abbildung 7). Im ersten Durchlauf wird das Verhalten von Photonen untersucht:

1. *Photoeffekt*: Die Einführung in die Quantenphysik erfolgt in herkömmlicher Weise über den Photoeffekt und den Photonenbegriff.
2. *Präparation*: Mit dem Begriff der Präparation einer Eigenschaft sollen die Schülerinnen und Schüler in die Lage versetzt werden, in geordneter Weise über das Besitzen und Nicht-Besitzen von Eigenschaften (wie „Ort“) von Quantenobjekten zu sprechen.
3. *Wellen- und Teilchenverhalten von Photonen*: Die Fähigkeit zur Interferenz und der lokalisierte Nachweis bei der Ortsmessung durch einen Detektionsschirm werden diskutiert. Das geschieht am Beispiel einer einfachen Interferometer-Anordnung, dem Mach-Zehnder-Interferometer (Abbildung 8).

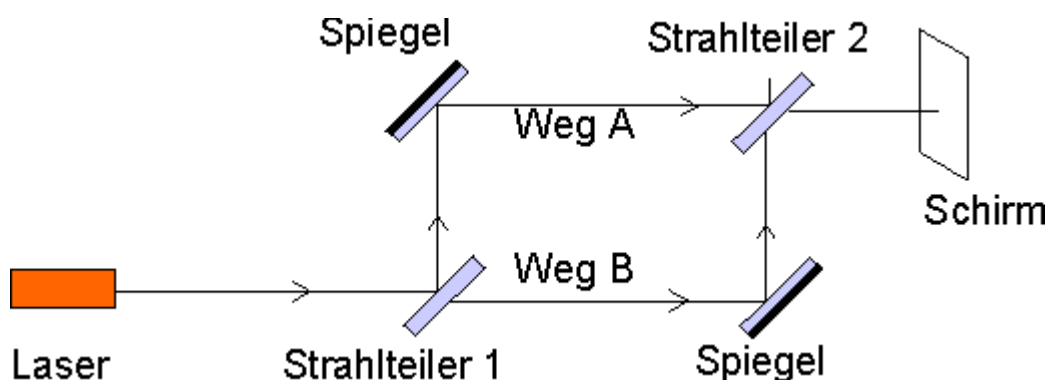


Abbildung 8: Schema eines Mach-Zehnder-Interferometers

4. *Ortseigenschaft von Photonen*: Am Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern im Strahlengang (Abbildung 9) wird argumentiert, dass man sich ein Photon – trotz des teilchenhaften Nachweises am Schirm – innerhalb des Interferometers nicht als lokalisiertes Gebilde mit der Eigenschaft „Ort“ vorstellen darf. Die entweder-oder-Vorstellung (Weg A oder Weg B) entspricht klassischen Denkmodellen, muss aber in der Quantenphysik aufgegeben werden.
Da Experimente mit einzelnen Photonen mit Schulmitteln kaum durchführbar sind, wird zur Veranschaulichung der Experimente das in Abbildung 9 dargestellte Simulationsprogramm genutzt [6]. Ergänzend oder alternativ kann der Gedankengang auch auf das Doppelspalt-Experiment mit Polarisationsfiltern übertragen werden. Hier ist ein eindrucksvolles Realexperiment (mit Laserlicht, also vielen Photonen) leicht durchführbar ([8]; Doppelspalt mit Polarisationsfiltern erhältlich bei [9]; Kosten: ca. 30 €).
5. *Wahrscheinlichkeitsinterpretation*: Wie im Zusammenhang mit Wesenszug 1 erläutert, wird verdeutlicht, dass die Vorhersagen der Quantenphysik statistischen Charakter besitzen.

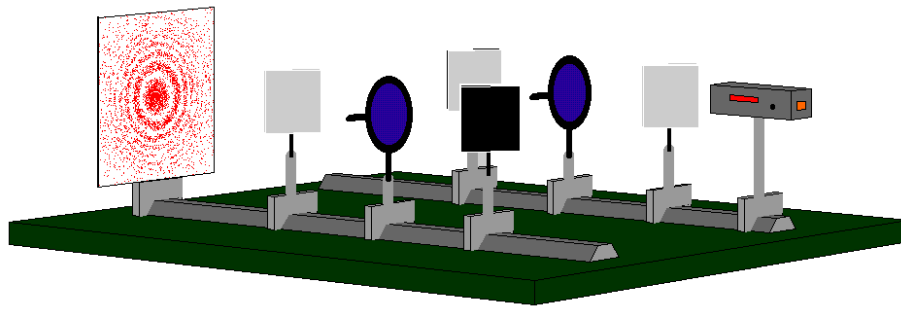


Abbildung 9: Simulationsprogramm zum Mach-Zehnder-Interferometer

Im zweiten Durchlauf der Basiskurs-Spirale werden Elektronen betrachtet (hauptsächlich im Doppelspaltexperiment). Die gleichen Themen wie im Fall der Photonen werden auf einem begrifflich höheren Niveau behandelt, nämlich mit der Formulierung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation über Wellenfunktionen. Auch hier bleibt die Diskussion qualitativ, d. h. die Wellenfunktion wird nicht in mathematischer Form eingeführt, sondern aus der Analogie mit klassischen Wellen (z. B. Wasserwellen) phänomenologisch gewonnen.

1. *Elektronenbeugung*: Wie im traditionellen Curriculum wird an der Elektronenbeugungsröhre demonstriert, dass Elektronen unter geeigneten Umständen die Fähigkeit zur Interferenz besitzen.
2. *Die Wellenfunktion ψ und die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation*: Bisher wurde die Wahrscheinlichkeitsdeutung qualitativ formuliert. Nun wird die Wellenfunktion ψ eingeführt. Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation wird folgendermaßen präzisiert: Einem Ensemble von identisch präparierten Quantenobjekten ist eine Wellenfunktion $\psi(x)$ zugeordnet. Sie breitet sich nach Wellengesetzen (ähnlich wie eine Wasserwelle in der Wellenwanne) aus. Die Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x)$, ein Quantenobjekt bei einer Messung am Ort x zu finden: $P(x) = |\psi(x)|^2$.
3. *Der quantenmechanische Messprozess*: Am Doppelspaltexperiment mit Lichtquelle (Abbildung 5) wird der aktive Charakter quantenmechanischer Messungen erarbeitet (Wesenszug 3). Bei jeder Messung an einem Quantenobjekt wird aus dem Spektrum der möglichen Messwerte (hier Spalt 1 oder Spalt 2) ein einzelner realisiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Messwert gefunden wird, lässt sich aus der Wellenfunktion mit der Bornschen Wahrscheinlichkeitsformel ermitteln.
Es ist möglich, dass nicht alle klassisch denkbaren Messwerte tatsächlich vorkommen (Beispiel: Quantisierung der Energie). Im Aufbaukurs wird dies aufgegriffen: Die möglichen Messwerte sind die Eigenwerte der gemessenen Größe.
4. *Komplementarität und Schrödingers Katze*: Diese beiden Themen vertiefen die Diskussion des quantenmechanischen Messprozesses. Mit den bisher eingeführten Begriffen ist in qualitativer Weise eine sinnvolle Auseinandersetzung mit derartigen Fragestellungen möglich.

5. *Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation*: Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation wird am Einzelspalt plausibel gemacht. Systematisch formuliert wird sie als eine Aussage über die gleichzeitige Präparierbarkeit zweier Größen an einem Ensemble von Quantenobjekten. Die enge Verbindung zu Wesenszug 4 (Komplementarität) wird gezeigt.

Im **Aufbaukurs**, der sich hauptsächlich an Leistungskurse richtet, sollen erste Einblicke in die formale Struktur der Quantenmechanik vermittelt werden und die im Basiskurs qualitativ gewonnen Kenntnisse quantitativ erweitert werden. Aus Platzgründen soll hierauf nicht weiter eingegangen werden.

11 Naiver Dualismus und Unbestimmtheitsrelation

Der „Welle-Teilchen-Dualismus“ und die Unbestimmtheitsrelation gehören zum Standard-Repertoire des traditionellen Quantenphysik-Unterrichts. Beiden Themen werden im Münchener Unterrichtskonzept auf deutlich andere Weise behandelt als üblich. Worin liegen die Gründe dafür?

Wie kaum etwas anderes trägt der „naive **Welle-Teilchen-Dualismus**“ zur selbstverschuldeten Mystifizierung der Quantenmechanik bei. Die traditionelle Formulierung lautet etwa so: „Manchmal verhalten sich Quantenobjekte wie Wellen und manchmal wie Teilchen.“ Stillschweigend hinzugefügt: Niemand weiß so recht, wann das eine und wann das andere eintritt. Man ist geneigt, vom „Rosenkavalier-Dualismus“ zu sprechen: „Das alles ist geheim, so viel geheim.“ – „Und man ist dazu da, dass man's erträgt“, fügen die Schüler hinzu.

Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung der Wellenfunktion im Münchener Unterrichtskonzept nicht so „gewagt“ wie es scheinen mag. Ihr Zweck ist die symbolisch-mathematische Beschreibung der Fähigkeit zur Interferenz (Wesenszug 2). Sie erlaubt die begrifflich klare Verständigung über Interferenz im Quantenbereich. Nimmt man Wesenszug 3 hinzu (bei einer Ortsmessung durch den Detektionsschirm findet man das Elektron an einem ganz bestimmten Ort) erhält man eine vollständig transparente Beschreibung des sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus, völlig ohne Geheimnistuerei: Die Wellenfunktion gehorcht Wellengesetzen, und ihr Betragsquadrat gibt die Wahrscheinlichkeit an, das Quantenobjekt bei einer Ortsmessung an der betreffenden Stelle zu finden. Für jedes Experiment kann man eindeutig vorhersagen, ob „Wellenverhalten“ oder „Teilchenverhalten“ eintreten wird.

Die Darstellung der **Unbestimmtheitsrelation** ist vor allem in der populärwissenschaftlichen Literatur oft von mystischem Raunen geprägt. Schon über die Bedeutung der Symbole Δx und Δp herrscht viel Unklarheit. Oft werden sie als subjektive Unkenntnis des wahren Werts oder als Messungenauigkeiten interpretiert.

Dabei ist auch hier begriffliche Sorgfalt mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich. In der Relation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

ist Δx oder Δp keine Messunsicherheit oder -unschärfe. Vielmehr ist der Ort im gleichen Sinne unbestimmt, wie beim Doppelspalt-Experiment unbestimmt ist, durch welchen Spalt das Quantenobjekt geht. Es gibt keinen „wahren Ort“, den das Quantenobjekt unabhängig von einer Messung hat. Wenn wir eine Ortsmessung durchführen, so bekommen wir zwar ein bestimmtes Ergebnis (Wesenszug 3). Doch wird dieses Messergebnis vom Zufall abhängen und bei vielen Messungen an identisch präparierten Quantenobjekten eine statistische Streuung aufweisen. Die Streuung Δx ist ein Maß dafür, wie unbestimmt der Ort des Quantenobjekts vor der Messung ist. Ebenso ist Δp ein Maß für die Unbestimmtheit des Impulses, d. h. für die statistische Streuung der Impulsmesswerte. Die Aussage der Unbestimmtheitsrelation ist nun, dass es nicht möglich ist, Quantenobjekte in einen Zustand zu bringen, in dem Δx und Δp gleichzeitig beliebig klein sind.

12 Ressourcen

Für Lehrkräfte, die sich mit dem Münchener Unterrichtskonzept vertraut machen möchten, wurde die **Internet-Plattform *milq*** errichtet [6]. Hier findet man einen Einführungskurs in das Konzept mit Hintergrundinformationen, Unterrichtsmaterialien und Downloadmöglichkeiten. Neben dem vollständigen Lehrtext stehen dort auch die oben besprochenen Simulationsprogramme frei zur Verfügung.

Aufgaben bilden einen zentralen Bestandteil des Unterrichts. Da das Unterrichtskonzept weitgehend qualitativ orientiert ist, ist hier etwas Umdenken erforderlich (das im Zuge der neuen Aufgabenkultur aber auch in anderen Gebieten erfolgen muss). Ausgearbeitete und erprobte Aufgabenbeispiele finden sich in [4]. Auch auf den Internet-Seiten von *milq* sowie unter [10] gibt es Arbeitsblätter und Aufgaben. Dass derartige Aufgaben auch in Prüfungssituationen eingesetzt werden können, zeigt das baden-württembergische Abitur, in dem sie seit 2004 kontinuierlich gestellt werden (dokumentiert auf quantenphysik-schule.de).

Es soll erwähnt werden, dass die 2004 von der KMK verabschiedeten „Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung“ (EPA) im Bereich der Quantenphysik den hier vorgestellten Ideen im wesentlichen entsprechen: „Grundlegende Merkmale von Quantenobjekten unter Einbezug erkenntnistheoretischer Aspekte: Wellenmerkmal, Quantenmerkmal, stochastisches Verhalten, Komplementarität, Nichtlokalität, Verhalten beim Messprozess.“ In den EPA findet man auch ausgearbeitete Aufgabenbeispiele.

13 Evaluation des Unterrichtskonzepts

Der Kurs wurde systematisch in 5 Oberstufenklassen (2 Grundkurse, 3 Leistungskurse) mit zusammen etwa 60 Schülerinnen und Schülern evaluiert. Die Kurse wurden von ihren regulären Lehrkräften anhand des Lehrgangs-Manuskriptes unterrichtet. Die Unterrichtseinheit erstreckte sich über etwa 25 Stunden.

In der Evaluation, deren Einzelheiten in [2] näher beschrieben werden, sollte untersucht werden, ob es den Schülerinnen und Schülern gelang, im Verlauf des Unterrichts korrekte quantenmechanische Vorstellungen zu entwickeln. Dazu wurden unter anderem eingesetzt:

- ein Vorstellungsfragebogen mit freien Antwortmöglichkeiten sowie vorgegebenen Aussagen, die die Schülerinnen und Schüler beurteilen sollen,
- teilstrukturierte Interviews in zwei der Klassen (N=22).

Um das „teach-to-the-test“-Phänomen zu vermeiden, wurden viele der zu beurteilenden Aussagen im Fragebogen aus Tests *anderer* Autoren übernommen. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass der Test diejenigen Inhalte abfragt, die von einem größeren Kreis als wesentliche Aussagen der Quantenmechanik angesehen werden.

Um die Vielzahl der im Fragebogen zu beurteilenden Items knapp und doch aussagekräftig darstellen zu können wurde aus jeweils mehreren Items Vorstellungsindizes gebildet. Jeder Index bezog sich auf eines der Themengebiete Wahrscheinlichkeitsdeutung, Atomvorstellung, Eigenschaftsbegriff und Unbestimmtheitsrelation. Ein Indexwert von +100 bedeutet, dass alle Antworten den quantenmechanischen Vorstellungen voll entsprechen. Ein Indexwert von -100 bedeutet dagegen, dass bei allen Items diejenige Antwort gewählt wurde, die den korrekten quantenmechanischen Vorstellungen völlig zuwiderläuft. Ein Indexwert von 0 bedeutet eine indifferente Haltung.

Die Auswertungsergebnisse des Fragebogens zeigen, dass es in den unterrichteten Klassen in erfreulich hohem Maß gelang, die erwünschten quantenphysikalisch korrekten Vorstellungen zu erzeugen:

- *Wahrscheinlichkeitsdeutung*: Es ergab sich ein Mittelwert von + 70,2 Indexpunkten bei einer Standardabweichung von 22,8.
- *Atomvorstellung*: Mittelwert +60,9 Indexpunkte, Standardabweichung 28,4 Indexpunkte.
- *Unbestimmtheitsrelation*: Mittelwert +50,6 Indexpunkte, Standardabweichung 20,4.
- *Eigenschaftsbegriff*: Mittelwert +45,6 Indexpunkte, Standardabweichung 39,9.

Die Interviewergebnisse, die ausführlich in [2] dargestellt werden, bestätigen dieses positive Bild.

Da sich das Münchener Unterrichtskonzept schon in den angestrebten Lernzielen grundlegend vom traditionellen Unterricht unterscheidet, erschien es nicht sinnvoll, in der Untersuchung ein Kontrollgruppendesign zu verwenden. Um jedoch nicht ganz auf eine Vergleichsmöglichkeit verzichten zu müssen, wurden die Vorstellungen einer Vergleichsgruppe mit dem Vorstellungsfragebogen untersucht. Dabei handelte es sich um Physikstudierende aus dem 2. Semester (Lehramt und Diplom) die Physik in der Schule nicht abgewählt hatten. Ihr Schulunterricht lag einerseits noch nicht so lange zurück, dass sie ihre Vorstellungen gewissermaßen „vergessen“ hätten, andererseits waren sie an der Universität noch nicht mit Quantenphysik in Berührung gekommen. Eine Vergleichbarkeit der Gruppen konnte nicht vorausgesetzt werden; bei den Studierenden handelte es sich um eine positiv selektierte Gruppe. Für den Vergleich wurden nur diejenigen Items herangezogen, die als „fair“ gegen-

über der Studierendengruppe angesehen werden konnten, weil sie zur „quantenmechanischen Allgemeinbildung“ gehören (sollten).

Bei dem Vergleich schnitt die Erprobungsgruppe deutlich besser ab als die Studierendengruppe. In allen untersuchten Bereichen waren die Unterschiede hochsignifikant bzw. signifikant.

Als Ergebnis der Evaluation kann man feststellen: Trotzdem das Münchener Unterrichtskonzept kein „einfacher“ Unterrichtsgang ist, hat sich die Hoffnung, die seiner Entwicklung zugrunde lag, in erfreulicher Weise erfüllt: dass es den Schülerinnen und Schülern gelingt, mit Hilfe eines Kurses von größtmöglicher begrifflicher Klarheit die Schwierigkeiten der Quantenphysik zu meistern

Literatur

[1] H. Wiesner, P. Engelhardt, Präparationsexperimente als Leitlinie einer Einführung in die Quantenphysik für Grund- und Leistungskurse. Physik in der Schule 32 (1994), S. 271.

[2] R. Müller, Quantenphysik in der Schule, Logos-Verlag Berlin (2003).

[3] R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf, Schülervorstellungen in der Physik, Aulis-Verlag Köln (2004).

[4] J. Küblbeck, R. Müller, Die Wesenszüge der Quantenphysik, Aulis-Verlag Köln (2002).

[5] R. Müller, H. Wiesner, Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, Physik in der Schule 38 (2000), S. 126, verfügbar unter:

www.tu-braunschweig.de/ifdn/physik/veroeffentlichungen/quantenphysik

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

[7] Kuhn Physik 2, Westermann, Braunschweig (2000).

[8] J. Küblbeck, Der Quantenradierer: Ein einfaches Experiment mit Polarisationsfolien am Doppelspalt für den Physikunterricht, PdN-Ph. 8/49 (2000), S. 22

[9] www.muero-fraeser.de, Suchwort: Quantenradierer

[10] www.quantenphysik-schule.de