

Quantenphysik im Schulunterricht

Diplomarbeit

eingereicht an der Fakultät für Naturwissenschaften und
Mathematik der Universität Wien

**zur Erlangung des akademischen Grades
Magister der Naturwissenschaften**

Betreuer: Univ. Prof. Helmut Kühnelt

Verfasser: Walter Doubek,
Matrikelnr.: 9625827

Juni 2004

Vorwort

Bei der Erstellung meiner Arbeit waren mir sehr viele Menschen hilfreich, von denen ich hier einige namentlich erwähnen möchte.

Mein erster Dank richtet sich an meine Eltern, die mich während meiner gesamten Studienzeit tatkräftig unterstützt haben.

Dann möchte ich mich natürlich auch bei meinem Betreuer Univ. Prof. Helmut Kühnelt bedanken. Nachdem in seinem Seminar die Idee zur Diplomarbeit entstanden ist, hat er mich immer bei offenen Fragen unterstützt und mit Vorschlägen versorgt. Trotzdem hat er mir sehr viele Freiheiten in der Gestaltung meiner Arbeit gelassen. Auch für seine schnelle Korrektur der vorgelegten Entwürfe bin ich sehr dankbar.

Weiters gilt mein Dank allen befragten LehrerInnen, die sich kurzfristig bereit erklärt haben, ihre Zeit für Interviews zur Verfügung zu stellen.

Besonderer Dank gilt Mag. Martin Wertjanz vom BRG 2 Wohlmutterstrasse, der mir erlaubte in seiner Klasse den Einsatz von Computersimulationen zu erproben. An dieser Stelle gilt natürlich mein Dank auch den Schülern der 8B, die so fleißig mitgemacht haben.

Beim Thema Computer möchte ich mich bei allen Freunden bedanken, die mir bei der Lösung von Computerproblemen geholfen haben.

Zum Schluss möchte ich mich noch bei meiner Freundin Andrea und deren Mutter bedanken, die beim Korrekturlesen große Ausdauer gezeigt haben.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Vorstellung von Unterrichtskonzepten	2
1.1 Motivation	2
1.2 Die Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“	4
1.3 Das Konzept der Vier Wesenszüge	10
Stochastische Vorhersagbarkeit.....	12
Fähigkeit zur Interferenz.....	13
Eindeutige Messergebnisse.....	15
Komplementarität.....	16
1.4 Zusammenfassung	18
2. Lehrerbefragung zur Quantenphysik im Schulunterricht	19
2.1 Einleitung und Begründung der Methode	19
2.2 Ziele der Befragung	20
2.3 Ergebnisse der Befragung	24
Wertung der einzelnen Begriffe.....	26
Die Unschärferelation.....	26
Das Bohr'sche Atommodell.....	29
Das Korrespondenzprinzip.....	33
Die Quantenzahlen.....	34
Das Doppelspaltexperiment.....	36
Die Energieniveaus.....	37
Das Pauli – Prinzip.....	38

Der Photoeffekt.....	39
Die Materiewellen.....	43
Das EPR-Paradoxon.....	45
Begriffe, die ein Schüler als Minimalziel erklären können sollte.....	48
Wo haben die Befragten ihr Wissen zur Quantenphysik erworben?.....	51
Welche Materialien zur Unterrichtsvorbereitung verwendet werden.....	52
Welche Medien werden im Unterricht zur Quantenphysik verwendet.....	53
Multimediamaterial im Unterricht zur Quantenphysik.....	54
Welches Buch würden Sie einem interessierten Schüler empfehlen?.....	56
Wünsche zur Verbesserung des Unterrichts zur Quantenphysik.....	58
Verwendete Unterrichtseinheiten für den Block Quantenphysik.....	62
Zeitpunkt des Unterrichts der Quantenphysik.....	63
Typische Fragen der Schüler zur Quantenphysik.....	64
2.4 Zusammenfassung.....	66
Kurzzusammenfassung der Lehreraussagen.....	68
3. Computereinsatz im Unterricht zur Quantenphysik.....	70
3.1 Allgemeine Bemerkungen zum Einsatz des Computers im Unterricht.....	71
Veränderungen in der Rolle der Lehrperson.....	74
Verwendungsmöglichkeiten von Internet und PC im Unterricht.....	77
Welche Veränderungen können durch den Einsatz von PC und Internet im Unterricht entstehen?.....	78
3.2 Einsatz des Computers im Unterricht zur Quantenphysik.....	82
3.3 Vorstellung von Simulationen zur Quantenphysik.....	86
Visual Quantum Mechanics.....	86
Absorptionsspektren.....	86
Emissionsspektren.....	88
Franck Hertz Experiment.....	90

Tunneleffekt.....	92
Doppelspaltversuch.....	93
Mach Zehnder Interferometer	97
Bombentest von Elitzur und Vaidmann.....	98
Übersicht über die vorgestellten Simulationen.....	106
3.4 Erprobung von Simulationen im Unterricht	107
3.5 Zusammenfassung.....	110
Literaturverzeichnis.....	111
Abbildungsverzeichnis.....	114
Anhang A.....	115
Anhang B.....	116
Lebenslauf.....	119

Einleitung

Quantenphysik im Schulunterricht ist ein Thema, das in der Fachdidaktik sehr häufig behandelt wird und bei dem es eine Menge verschiedener Ansätze gibt, dieses doch schwierig vermittelbare Thema für den Unterricht brauchbar aufzubereiten. Dies ist auch sehr verständlich, da ja seit den Anfängen der Quantenphysik ein Hauptdiskussionsthema ist, wie man die quantenphysikalischen Vorgänge verstehen und interpretieren kann.

Im **ersten Kapitel** wird zuerst kurz meine Motivation, sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen, angeschnitten und danach zwei Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik vorgestellt. Dabei handelt es sich um die „Berliner Konzeption“ und das Konzept der „Vier Wesenszüge“.

Im **zweiten Kapitel** werden die Ergebnisse einer von mir durchgeführten Lehrerbefragung präsentiert und interpretiert. Die Methode der Lehrerbefragung soll einen Bezug zu der Situation in den Schulen herstellen und eine Möglichkeit des Vergleichs bieten, inwieweit die Unterrichtskonzepte, die seitens der Fachdidaktik vorgebracht werden, überhaupt im Schulalltag umsetzbar sind.

Im **dritten Kapitel** soll der Computereinsatz im Unterricht zur Quantenphysik beleuchtet werden. Welche Punkte sprechen für den vermehrten Computereinsatz im Allgemeinen und welche speziell für den Einsatz im Quantenphysikunterricht? Der Einsatz von Computern wird ein immer zentraleres Thema, wie man auch an der sehr schnell anwachsenden Anzahl von Notebookklassen erkennen kann. Weiters werden in diesem Kapitel einige Simulationen zur Quantenphysik vorgestellt und die kurze Erprobung im Unterricht besprochen.

Zum Abschluss sind im Anhang A die verwendeten Interviewfragen zu finden und im Anhang B die im Unterricht verwendeten Materialien

1. Vorstellung von Unterrichtskonzepten

Im ersten Kapitel gibt es eine kurze Einleitung, in der kurz die Motivation besprochen wird, sich mit dem Thema Quantenphysik im Schulunterricht auseinanderzusetzen. Danach werden in den zwei folgenden Unterkapiteln zwei Unterrichtskonzepte vorgestellt, nämlich das Berliner Konzept und das Konzept der Vier Wesenszüge. Beide Konzepte sind vor relativ kurzer Zeit vorgestellt worden und verdienen sicherlich Beachtung bei der Auseinandersetzung mit dieser Thematik.

1.1 Motivation

Worin liegt die Motivation, sich mit dem Thema der Quantenphysik im Schulunterricht auseinanderzusetzen? In meinem Fall wurde das Interesse an diesem Thema durch einen Seminarbesuch geweckt. In dem Seminar „Moderne Physik und Schule“ von Embacher und Kühnelt wurde die Thematik der Quantenphysik in Verbindung mit der Schule behandelt. Durch die dort gewonnenen Eindrücke wollte ich mich weiter mit diesem Thema auseinandersetzen. Dies konnte ich nun durch meine Arbeit bewerkstelligen.

In der Erarbeitung der Quantenphysik an der Schule gibt es immer wieder Schwierigkeiten, die aber nicht nur auf didaktische Probleme zurückzuführen sind, sondern auch darauf, dass der Umgang mit der Quantenphysik schwierig ist, wie die Aussage von Bader zeigt:

Warum fällt uns „Bewohnern der klassischen Alltagswelt“ der Umgang mit der Quantenwelt so schwer? Nun, wir halten vernünftigerweise am sogenannten Realitätspostulat fest: Wir zweifeln nicht, dass der Mond existiert, auch wenn gerade niemand nach ihm schaut. Einstein z.B. spottete, nur die Quantentheoretiker seien zu solchen Zweifeln fähig.

(Bader 2002, S.52)

Daraus kann man folgern, dass es unmöglich ist, sich mit den von unserer Alltagswelt geprägten Vorstellungen in der Welt der Quantenobjekte zurecht zu finden. Dies drückt auch der berühmte Physiker Richard Feynman in seinem Zitat aus, welches im Buch „Quantenmechanik verstehen“ von Pietschmann übersetzt wurde:

Even the experts do not understand it the way they would like to, and it is perfectly reasonable that they should not, because all of direct, human experience and of human intuition applies to large objects.

(Selbst die Experten verstehen sie nicht so, wie sie gerne wollten, und das ist auch vernünftig, weil sich alle menschliche Erfahrung und Intuition auf große Objekte bezieht.)

(Pietschmann 2003, S.V)

Wie man an dieser Aussage erkennen kann, ist es sicherlich keine leichte Aufgabe, Schülern die Quantenphysik verständlich näher zu bringen, wenn schon einer der besten Physiker auf diesem Gebiet zugibt, dass Anschauungsschwierigkeiten selbst bei Experten auftreten, ja sogar auftreten müssen. Eine weitere Problematik wird ebenfalls von Pietschmann in seinem Buch „Phänomenologie der Naturwissenschaft“ dargestellt:

Während es für alle anderen Teilgebiete der Physik einen mehr oder weniger „klassischen“ Darstellungsmodus gibt, ist dies bei der Quantenmechanik nicht der Fall. Zwar gilt es für den mathematischen Teil, weil dieser ja keine Widersprüche enthält. Aber die Interpretation wird vermutlich von jedem akademischen Lehrer anders dargestellt, wobei jeder meint, seine Methode sei wohl die einleuchtendste. ...Daher entstehen auch immer wieder neue Lehrbücher der Quantenmechanik, die jeweils eine andere Darstellung bringen, ohne zum mathematischen Apparat wesentliches hinzuzufügen.

(Pietschmann 1996, S.208)

Aus diesen Aussagen kann man einen Schluss ziehen. Es ist die Problematik im Umgang mit der Quantenphysik dadurch gegeben, dass mit unserer verinnerlichten Anschauung die Welt der Quantenphysik nicht beschrieben werden kann. Dadurch gibt es auch viele verschiedene Interpretationen, da jeder einen anderen Weg beschreitet, um die Quantenphysik begreiflich zu machen.

Trotz oder gerade wegen dieser Schwierigkeiten ist die Quantenphysik ein Gebiet der Physik, das großes Interesse auf sich zieht und wahrscheinlich in der Zukunft so wie in der Vergangenheit einige bahnbrechende Neuerungen für unseren Alltag parat haben wird. Durch diese Optionen bietet es sich an, zwei Konzepte seitens der Fachdidaktik, die sich mit diesem Thema auseinandersetzen, einmal näher zu betrachten.

1.2 Die Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“

Bei der Berliner Konzeption wurde ein Konzept zum Unterrichten der Quantenphysik, unter der Leitung der Fachdidaktiker Fischler und Lichtfeld von einer Gruppe von Lehrern und Didaktikern in Berlin erstellt. Dieses Konzept war vor allem als Reaktion auf die lernpsychologisch bedenklichen Gewohnheiten in der Darstellung quantenphysikalischer Grundlagen erarbeitet worden.

Im Beitrag von Fischler wird, in dem von ihm herausgegebenen Band „Quantenphysik in der Schule“ die Grundidee der Konzeption so dargestellt:

Im Kern geht es in der Konzeption um eine Alternative zu einem Unterricht, der durch die Orientierung an der historischen Entwicklung in der Gefahr steht, die neuen Phänomene der Quantenphysik mit den in der klassischen Physik entstandenen Denkstrukturen zu erklären. Seit langem gibt es eine deutliche Kritik an Auswahl und Anordnung von Teilthemen zur Quantenphysik innerhalb von Schulbüchern und Lehrplänen, dennoch ist die traditionelle Konzeption auch heute noch in den meisten Vorgaben für die Physiklehrer enthalten, sie folgt im wesentlichen den Etappen der historischen Entwicklung, die mit der Entdeckung der Quantennatur des Lichts beginnt und mit der Quantenmechanik abschließt.

(Fischler 1992, S.245)

Jetzt stellt sich nun zuerst einmal die Frage, was unter der traditionellen Konzeption verstanden wird und welche Kritikpunkte vorgebracht werden. Das traditionelle Konzept wird von Fischler (1992, S.245ff.) folgendermaßen dargestellt, wobei manche Punkte verkürzt zitiert werden:

- Einsteins Erklärung des lichtelektrischen Effekts steht mit am Anfang dieses Prozesses. Das Photon ist daher, wie im Berliner Lehrplan, oft der Einstieg in die Quantenphysik: „Versuch zum lichtelektrischen Effekt als Zugang zum Begriff des Energiequants“. Die Deutung des Versuchs gelingt mit der Annahme, dass die Photonen als „Lichtteilchen“ die Energie $h \cdot f$ besitzen.
- Der Compton Effekt bestärkt die Lichtquantenhypothese. Er wird erklärbar, wenn den Photonen auch ein Impuls zugeschrieben wird.

- Für das Licht ist damit (nach der vorher behandelten Wellenoptik) die Doppelnatur gezeigt: Es gibt einen Dualismus Welle- Teilchen.
- Die Hypothese von de Broglie überträgt dieses Prinzip auf Elektronen. Die Elektronenbeugung legt es nahe, den Elektronen, die bisher als klassische Teilchen behandelt wurden, auch Wellencharakter zuzuschreiben. „Materiewellen“ sind dann das Analogon zu Lichtwellen.
- Die Linienspektren und die Energiequantelung im Atom (Franck-Hertz-Versuch) werden mit dem Bohrschen Modell erklärt. Am Ende dieses Unterrichtsabschnitts wird darauf hingewiesen, dass das Bohrsche Modell von der widerspruchsfreien Beschreibung der Quantenmechanik abgelöst wird.

Wo liegen denn nun die Kritikpunkte an diesem Vorgehen? Man könnte ja durchaus argumentieren, dass die oben skizzierte Vorgangsweise einen sehr spannenden und motivierenden Zugang bietet, da die Entwicklung der Quantentheorie selbst außergewöhnlich schnell und dementsprechend interessant verlaufen ist. Wenn man dieses Argument entkräften will, muss man schon sehr starke Gegenargumente parat haben. Meiner Meinung nach sind die von Fischler vorgebrachten Argumente sicherlich stark genug, um den Aufbau des Unterrichts der Quantenphysik zu überdenken. Die angeführten Argumente von Fischler beziehen sich auf vier Themenbereiche, die sich unter lernpsychologischen Gesichtspunkten als besonders problematisch erwiesen haben:

- Die Quantenphysik nun ausgerechnet mit Photonen zu beginnen, ist aus zwei Gründen ungünstig: Der lernpsychologische Nachteil spiegelt sich in zahlreichen Schülerbefragungen wider, in denen eine enge Verknüpfung des Photons mit der Teilchenvorstellung deutlich wird. Fachlich ist die Einführung von Lichtquanten insofern problematisch, als sie zur Erklärung des Effekts nicht zwingend notwendig sind.
- Für die Schüler ist das Bohr'sche Modell ein äußerst attraktives Instrument zur Erklärung der atomaren Erscheinungen, insbesondere zur Berechnung der Lichtfrequenzen. Sie werden kaum bereit sein, nach der wiederholten

Demonstration der Leistungsfähigkeit dieses Modells sich davon zu lösen, wenn es am Ende des Lehrgangs heißt, das Modell sei durch gänzlich andere Annahmen zu ersetzen.

- Der „Doppelcharakter“ des Lichts wird meist mit der Formulierung beschrieben, dass es vom Experiment abhängt, welcher Aspekt des Lichts sichtbar wird, die Teilchen- oder die Welleneigenschaft. Auch in der Schule kann gezeigt werden, dass diese Redeweise mehr als fragwürdig ist: Ein Interferenzmuster, das sich aus stochastisch verteilten Punkten aufbaut, zeigt beide Aspekte, oder besser: keinen von beiden, denn sowohl Wellen als auch klassische Teilchen zeigen ein jeweils völlig anderes Verhalten.
- „Materiewellen“ müssen den Schülern völlig unverständlich bleiben. Zu stark ist dieser Begriff mit klassisch-mechanistischen Vorstellungen verknüpft, als dass er von den Schülern als reine Rechengröße akzeptiert werden könnte. Am ehesten denken sie dabei an „Führungswellen“, weil sie dabei klassische Vorstellungen (von Wellen und Teilchen) miteinander verbinden und auf die Quantenphysik anwenden können.

Diese vier Argumente sind ein eindeutiges Zeichen, dass die traditionelle Konzeption zu überdenken sei, gibt Fischler zu bedenken und führt jetzt, nach seiner Kritik, das Berliner Konzept ein. Die didaktischen Grundsätze werden durch folgende Punkte charakterisiert:

- Bezüge zur klassischen Physik werden weitgehend vermieden.
- Der Kurs beginnt mit den Quantenobjekten Elektronen. Diese Entscheidung wird damit begründet, dass die Neigung der Schüler, Photonen mit der Teilchen Vorstellung zu verbinden, ein Modell der klassischen Physik also in die Mikrowelt mit hinüberzuretten, größer ist als die Bereitschaft, Elektronen mit der Wellen-Vorstellung zu verknüpfen. Der Nachteil, dass der Doppelspaltversuch mit Elektronen nur im Film gezeigt werden kann, wird durch didaktische Vorteile mehr als aufgewogen.

- Vermeidung der dualistischen Sprechweise: Die statistische Deutung der beobachteten Phänomene bei Elektronen und Licht ermöglicht eine widerspruchsfreie Beschreibung.
- Einführung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation zu einem früheren Zeitpunkt (Formulierung für Ensembles von Quantenobjekten)
- Behandlung des Wasserstoffatoms ohne das Bohrsche Modell

Danach wird noch angemerkt, dass diese angeführten Prinzipien in der didaktischen Diskussion keineswegs neu sind und schon verschiedentlich für den Unterricht vorgeschlagen worden sind. Allerdings, so besagt der Artikel, unterscheidet sich das Berliner Konzept in der konsequenten Zusammenstellung von den bisherigen Vorlagen. Dennoch bleibt es voll verträglich mit herkömmlichen Lehrplänen, da nur durch eine andere Anordnung der Inhalte eine besondere Schwerpunktsetzung erfolgt. Dazu kommen noch eine besondere Schwerpunktsetzung und einige Vorgaben für die verbalen Beschreibungen. Diese Grobstruktur wurde als Unterrichtsanleitung an alle Berliner gymnasialen Oberstufen verteilt.

In der inhaltlichen Grobstruktur (Fischler 1992, S.248ff.) sind folgende Punkte - manche nur auszugsweise- enthalten:

1. *Elektronenbeugung*

Mittels des auf dem Schirm erzeugten Musters, das von der Optik her bekannt ist, wird diesen Ringen eine Wellenlänge zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen den Werten für den Impuls der Elektronen und den zuordenbaren Wellenlängen wird durch die de Broglie Beziehung beschrieben. Die Wellenlänge wird in dieser Phase nur dem Beugungsbild zugeordnet, weil eine andere Interpretation nicht möglich ist, wenn man nicht durch die Einführung von Führungs- oder Materiewellen Verwirrung stiften und falsche Vorstellungen festigen möchte.

2. *Doppelspaltversuch mit Elektronen*

Es wird ein Film von dem Doppelspaltversuch mit Elektronen gezeigt. Die Intensitätsverteilung nach dem Doppelspalt gleicht dem Interferenzmuster mit Licht. Daher kann gefolgert werden: Elektronen sind keine klassischen Teilchen. Bei reduzierter Intensität sind stochastisch verteilte Einzelprozesse zu beobachten. Daher können Elektronen keinen Wellenvorgang bilden. Sie werden als Quantenobjekte bezeichnet, deren Verhalten mit Begriffen der klassischen Physik nicht beschrieben werden kann.

Das Realexperiment vermittelt einen wesentlich stärkeren Eindruck, als die in den Schulbüchern oft dargestellten Gedankenexperimente. Am Doppelspaltversuch kann auch sehr überzeugend der Bahnbegriff für die Elektronen in Frage gestellt werden. Das „Interferenzbild“ baut sich auch dann auf, wenn die Intensität der Elektronenquelle sehr stark reduziert ist, so stark, dass zu diesem Zeitpunkt vielleicht nur ein Elektron unterwegs ist. Die Vorstellung, das Elektron würde dann auf einer bestimmten Bahn durch einen der beiden Spalte „fliegen“, ist nicht haltbar, denn dann müsste es wissen, ob der jeweils andere Spalt geöffnet oder geschlossen ist.

3. *Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation (HU)*

Es gibt keine auf Schulniveau durchführbare Herleitung der HU, sie wird aber trotzdem den Schülern erklärt. Die üblichen Überlegungen am Einfachspalt sind allenfalls eine beispielhafte Erläuterung, aber kein Beweis. Sie verwenden überdies Vereinfachungen, die nicht begründet werden können.

Folgerungen aus der HU: Problematisierung des Bahnbegriffs in der Mikrophysik. Lokalisationsenergie: Aus der Begrenzung des Aufenthaltsbereichs von Quantenobjekten folgt der Besitz von kinetischer Energie.

4. *Energiequantelung im Potentialtopf und im Wasserstoff-Atom*

Analogiebetrachtung: Beim Doppelspaltexperiment haben sich die Elektronen wie in der Interferenzfigur angeordnet. Beim Potentialtopf mit undurchdringlichen Wänden wird es vermutlich eine Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten geben, die stehenden Wellen ähnlich ist.

5. *Franck-Hertz- Versuch, Spektraluntersuchungen*

Der Franck-Hertz-Versuch als Bestätigungsversuch für die Energiequantelung. Die Quecksilber-Atome nehmen Energie nur in bestimmten Portionen auf. Diese Energie wird in Form von Strahlung abgegeben. Für Hg ergibt sich zwischen dem gemessenen Wert und der in der Schule nicht messbaren, also mitzuteilenden Frequenz der Zusammenhang $E = h \cdot f$, mit demselben Wert der Konstanten h wie in der de Broglie Beziehung.

6. *Quantelung des Lichts*

Photoeffekt: $h \cdot F = E_A + E_e$

E_A : Energieportion, die notwendig ist, damit die Elektronen aus dem Festkörper austreten können.

E_e : Überschüssige Energie übernehmen die Elektronen als kinetische Energie.

Compton- Effekt: Wechselwirkung zwischen Photon und Elektron. Darstellung ohne Analogie zu makroskopischen Stoßprozessen, Impulsdiagramm ohne Körperdarstellung.

7. *Deutungsprobleme*

Was bedeutet λ bei Elektronen und Licht? Kausalität in der modernen Physik. Kopenhagener Interpretation.

Bei diesem Konzept ist noch zu erwähnen, dass eine Erprobung stattgefunden hat und deren Ergebnisse auch durch Lichtfeld (1992) dokumentiert wurden. Durch Videobeobachtungen des Unterrichts in sechs Kursen konnte eine Analyse der Lern und Verständnisschritte der Schüler in konkreten Unterrichtssituationen betrieben werden. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen einer Kontrollgruppe (14 Kurse) verglichen. Es wurde vor allem untersucht, wie sich der Einsatz dieses Konzepts auf die Vorstellungen der Schüler auswirkt. Es war vor allem ein Anliegen seitens der Konzeptersteller, diese Präkonzepte, sofern sie falsch waren, durch die quantenphysikalisch richtigen Vorstellungen zu ersetzen. Dies wurde mittels mehrerer Fragestellungen bewerkstelligt. Die Vergleichssituation durch die Kontrollgruppe machte ein noch deutlicheres Bild, wo die Unterschiede zwischen den Konzepten lagen.

Das Konzept schnitt in allen ausgewerteten Fragen sehr gut ab, und die Schlussbemerkung von Lichtfeld (1992, S.268) sei noch zitiert:

Alle ausgewählten Darstellungen haben gezeigt, dass ein Verändern der Vorstellungen der Schüler möglich ist. Das vorgestellte Unterrichtskonzept (siehe Fischler in diesem Band) trägt in hohem Maße dazu bei. Doch allein die veränderte Reihenfolge der Unterrichtsinhalte und ihre andere methodische Aufbereitung sind nicht ein Garant für einen im Sinne der Quantenphysik erfolgreichen Unterricht. Den Schülern muss ausreichend Raum für eigene sprachliche Interaktionen gegeben werden, damit sie sich den Bedeutungen ihrer Vorstellungsmuster überhaupt bewusst werden können. Dies hat auch zur Folge, dass sich die Schüler mit ihren bereits vor dem Unterricht vorhandenen Vorstellungen ernst genommen fühlen. Mit dem Bewusstseinsprozess selbst ist dann die Voraussetzung für mögliche langfristige Veränderungen der Vorstellungen im Sinne der physikalischen Begrifflichkeit gegeben.

Mit Hilfe dieser Grundüberlegungen war es möglich, mehr als 65% der Schüler aus der Erprobungsgruppe zu einem Wechsel ihrer Vorstellungen zu veranlassen, während in der Kontrollgruppe mit zwei Prozent ein befriedigender Wechsel kaum messbar wahr.

1.3 Das Konzept der Vier Wesenszüge

In dem Buch „Die Wesenszüge der Quantenphysik“ von Küblbeck und Müller wird eine Darstellung der Quantenphysik dargelegt, welche prinzipiell auf die Vermittlung von vier Wesenszügen beruht. In dem Buch wird zuvor noch auf den Begriff der Modellbildung im Unterricht eingegangen und dann auf die vier Wesenszüge, wie in der Einleitung von den Autoren beschrieben wird:

Eine wichtige Voraussetzung für eine befriedigende Beschäftigung mit der Quantenphysik ist, sich den modellierenden Charakter der Quantentheorie vor Augen zu halten. Wir wollen uns deshalb allgemein mit der Bildung von Theorien und Modellen in der Physik auseinandersetzen....

Die auf der Alltagserfahrung basierenden Vorstellungen und Konzepte, auf die wir uns alltäglich verlassen, sind in der Welt der Quantenphänomene unbrauchbar. Jedes Bild, jede Vorstellung, die man sich von den Quantenobjekten selbst macht, führt zu Widersprüchen. Dennoch sind überraschend allgemeingültige Aussagen – nicht bildhaft, sondern abstrakt – möglich. Im zweiten Kapitel werden vier zentrale Wesenszüge für einzelne Quantenobjekte anhand von übersichtlichen

Interferenzexperimenten herausgeschält. Jeder Wesenszug wird anhand von zusätzlichen Experimenten weiter untermauert und abschließend ausführlich interpretiert.

(Küblbeck/Müller 2003, S.9)

Wie sieht nun dieses Vorgehen aus? Zuerst einmal wird allgemein auf die Thematik der Modellbildung eingegangen. Dabei möchte ich mich auf die zusammengefassten Aussagen beschränken:

- Theorien werden erfunden, um die Wirklichkeit zu beschreiben.
- Aussagen der Theorie sind keine endgültigen Aussagen über die Wirklichkeit, sondern immer vorläufig.
- Aussagen über Elemente der Theorie sind nicht unbedingt Aussagen über die Wirklichkeit.
- Erklärung und Vorhersage erfolgen nach dem gleichen Schema.
- Theorien können nicht bewiesen, sondern nur falsifiziert werden.
- Fundamentale Gesetze können nicht abgeleitet werden.
- Gute Theorien sind beobachtungsnah, allgemein, einfach und quantitativ.
- Anschaulichkeit ist zur Beschreibung und für Vorhersagen nicht unbedingt nötig und oft auch nicht möglich.
- Formalismen können verschieden interpretiert werden.
- Nicht jedem Element des Formalismus muss ein Element der Wirklichkeit zugeordnet sein.
- Aber jedem Element der Wirklichkeit sollte ein Element des Formalismus zugeordnet sein.

Nach dieser kurzen Behandlung der Theoriebildung wenden sich die Autoren den vier Wesenszügen zu, die da lauten:

- Wesenszug 1: „Stochastische Vorhersagbarkeit“
- Wesenszug 2: „Fähigkeit zur Interferenz“
- Wesenszug 3: „Mögliche Messergebnisse“
- Wesenszug 4: „Komplementarität“

Zur Veranschaulichung der einzelnen Wesenszüge äußern sich die Autoren folgendermaßen:

Besonders deutlich zeigen sich die Wesenszüge für einzelne Quantenobjekte im seit Feynman didaktisch bewährten Doppelspalt-Experiment. Wir diskutieren in diesem Kapitel zur Einführung in jeden einzelnen Wesenszug idealisierte Doppelspalt-Experimente, an denen man die Wesenszüge gut verdeutlichen kann. Die Experimente sind – teils in komplizierten Abwandlungen – tatsächlich durchgeführt worden.

(Küblbeck/Müller 2003, S.25)

Danach wird noch ein Schema des Doppelspaltversuchs gezeigt, das der Abbildung 6 in Kapitel 3.3 entspricht, also von der Münchner Physikdidaktikgruppe stammt. Nun kann man sich aber den einzelnen Wesenszügen, deren Beschreibung (S.27-51) gekürzt wiedergegeben wird, zuwenden.

Stochastische Vorhersagbarkeit

Man könnte das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Atomen zu einem beliebigen Zeitpunkt stoppen und versuchen, den Nachweisort des nächsten Atoms vorherzusagen. Eine solche Vorhersage wäre jedoch reine Glückssache.

Die Verteilung, die sich nach vielen Wiederholungen des Experiments ergibt, ist – innerhalb von stochastischen Schwankungen- reproduzierbar. Offensichtlich kann man eine Aussage darüber machen, wie wahrscheinlich die Atome in den verschiedenen Bereichen nachgewiesen werden. Für Atome gelten stochastische Gesetzmäßigkeiten. Daraus folgern die Autoren den Wesenszug 1 „*Stochastische Vorhersagbarkeit*“:

- a) *In der Quantenphysik können Einzelergebnisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden.*
- b) *Bei vielen Wiederholungen ergibt sich jedoch eine Verteilung, die – bis auf stochastische Schwankungen – reproduzierbar ist.*

Als weitere Beispiele werden seitens der Autoren noch der Kernzerfall und die Reflexion an einem Strahlteiler angegeben.

Bei der Interpretation dieses Wesenszugs geben die Autoren an, dass es auch in der klassischen Physik häufig Vorgänge gibt, deren Ausgang scheinbar durch den Zufall bestimmt ist. Ein „klassisches“ Beispiel sei der Würfelwurf. Allerdings wenn man alle Anfangsbedingungen exakt wüsste, dann könnte man mit Newtons Gesetzen im Prinzip die gewürfelte Zahl genau vorhersagen. Und hier besteht der große Unterschied zur Quantenphysik. Auch wenn man alles Wissbare über den Anfangszustand eines Atoms weiß, ist es unmöglich, seinen Nachweisort vorherzusagen. Das Versuchsergebnis, hier der Ort des Nachweises, ist nicht determiniert, was zu *Folgerung 1* führt:

Während in der klassischen Mechanik der Ausgang von Experimenten grundsätzlich determiniert ist, ist bei quantenphysikalischen Ereignissen der Ausgang prinzipiell vom Zufall bestimmt.

Fähigkeit zur Interferenz

Das zweite Ergebnis des Doppelspalt- Experiments, das betrachtet wird, sind die Streifen am Schirm, die sich beim Sammeln der Detektionspunkte von vielen Atomen ergeben. Diese Streifen können nicht beobachtet werden, wenn einer der beiden Spalten verschlossen wird.

Es gibt eine große Anzahl von Quantenexperimenten, die solche Interferenzmuster zeigen. Diese werden auch dann beobachtet, wenn sich stets nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Anordnung befindet. Bei jedem dieser Experimente gibt es für das Eintreten eines bestimmten Versuchsergebnisses mehrere klassische Möglichkeiten, wie z.B. dass das Atom durch den linken Spalt oder durch den rechten Spalt zum Schirmpunkt X gelangt. Warum dies keine tatsächlich realisierten Möglichkeiten, sondern nur „klassisch denkbare“ Möglichkeiten sind, zeigen die Autoren erst nach der folgenden Formulierung von 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.

Danach wird gezeigt, warum es sinnvoll ist, nicht vom „Verhalten“ der Atome zu sprechen, also z.B. darüber, ob sie „durch den linken oder rechten Spalt gehen“, sondern diese Möglichkeiten nur „klassisch denkbar“ zu nennen.

In dieser Beschreibung werden einmal die Verteilungen für die beiden offenen Einzelspalte benannt. Danach stellt sich die Frage, was man erwartet, wenn man beide Spalte öffnet. Wenn man davon ausgeht, dass jedes Atom entweder durch den linken oder rechten Spalt geht, würde man sich einfach eine Addition der an beiden Einzelspalten gemessenen Verteilungen erwarten. Was man aber erhält ist das bekannte Interferenzmuster. Man bekommt also Schwierigkeiten, wenn man sich vorstellt, dass die Atome entweder links oder rechts durch den Spalt gehen.

Als Schlussfolgerung geben die Autoren an: Da jede Vorstellung darüber, wie ein Atom von der Quelle zum Schirm kommt, falsch ist, wollen wir konsequent sein und auch nicht mehr darüber sprechen. Wir werden nur noch darüber sprechen, ob und wie sie detektiert werden und insbesondere darüber, ob man nach vielen Wiederholungen ein Interferenzmuster erhält oder nicht. Das einzige, worüber Aussagen gerechtfertigt sind, sind Messergebnisse wie eben z.B. die Detektion des Atoms am Schirm.

Als weitere Beispiele werden die Beugung von Fulleren Molekülen bzw. die Beugung von Elektronen angegeben.

Bei der Interpretation wird ausgesagt, dass es nach der Standard- Interpretation nicht an der subjektiven Unkenntnis liegt, dass wir dem Atom keine Bahn zuschreiben können. Vielmehr führt die Annahme, dass das Atom auf irgendeiner beliebigen, auch unbekanntem Bahn unterwegs ist, zwangsläufig zum Widerspruch. Man sagt: Es ist objektiv unbestimmt, wie das Atom auf den Schirm kommt. Klassische Modelle versagen hier; insbesondere ist die Vorstellung einer Bahn nicht haltbar. Somit kommen die Autoren zu *Folgerung 2*:

Wenn es für ein Quantenobjekt mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, die zum gleichen Versuchsergebnis führen, dann realisiert das Quantenobjekt keine dieser Möglichkeiten. Vielmehr ist es objektiv unbestimmt, auf welche Weise das Versuchsergebnis eintritt.

Eindeutige Messergebnisse

Auch dieser Wesenszug wird wieder anhand des Doppelspalt- Experiments erläutert. Es werden seitens der Autoren folgende Fragen aufgeworfen: Es ist unbestimmt, wie das Atom von der Quelle zum Schirm gelangt. Was geschieht aber, wenn wir an den beiden Spalten je ein Messgerät zum Nachweis des Atoms aufstellen? Werden beide Messgeräte ein Signal geben, nur eines oder vielleicht gar keines?

Um ein Atom an einem der Spalten nachzuweisen, genügt es, wenn das Atom eine Markierung an dem entsprechenden Spalt hinterlässt, z.B. durch Anregung mittels eines Lasers, die die durchgehenden Rubidium-Atome zur Emission eines Photons im Mikrowellenbereich bringt. Dadurch kann also eine Ortsmessung durchgeführt werden.

Niemals stellt man fest, dass beim „Durchflug“ eines Atoms keiner der Detektoren anspricht, noch dass beide ansprechen.... Vielmehr zeigt sich, dass bei jedem Atom genau ein Detektor anspricht. Bei der Sprechweise wird noch angeführt, dass bei der Behauptung, dass das Atom „durch den linken Spalt gegangen ist“, leicht eine Verbindung zur klassischen Bahnvorstellung hergestellt wird. Auf der sicheren Seite sei man aber, wenn man nur über Messergebnisse spricht: „Das Atom wurde am linken Spalt nachgewiesen.“

Wenn man dies verallgemeinert, kommt man zum Wesenszug 3 „*Mögliche Messergebnisse*“:

- a) *Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist.*
- b) *Eine Wiederholung der Messung am gleichen Quantenobjekt führt zum gleichen Ergebnis, wenn das Quantenobjekt nicht zwischendurch anderweitig beeinflusst wurde.*

Bei der Interpretation fassen die Autoren zusammen: Das Atom befindet sich ohne die Messung in einem unbestimmten Zustand („weder klassisch links noch klassisch rechts“). Wird eine Messung durchgeführt, so erhält man a) ein eindeutiges Ergebnis und b) ist dieses Ergebnis nun mit Sicherheit reproduzierbar. Daraus kann man folgern, dass die Messung aus dem unbestimmten Zustand den Zustand „links“ gemacht hat.

Damit kommen die Autoren zu *Folgerung 3*:

Ist ein Quantenobjekt bezüglich einer Eigenschaft in einem unbestimmten Zustand, so wird es durch eine Messung auf diese Eigenschaft umpräpariert. Es befindet sich unmittelbar nach der Messung in einem Zustand, in dem diese Eigenschaft bestimmt ist.

Als weitere Beispiele werden die Ortsmessung bei Atomen, bei Photonen und die Polarisationsmessung angegeben.

Komplementarität

Auch dieser Wesenszug wird mittels einer Variante des Doppelspaltversuchs eingeführt: Mit Hilfe einer Photonen- „Markierung“ können die Atome am linken oder am rechten Spalt nachgewiesen werden. Anschließend werden sie auf den Schirm detektiert. Wirkt sich die Messung an den Spalten auf das Interferenzmuster aus?

Als Antwort wird seitens der Autoren angegeben, dass das Experiment zeigt, dass man beim Doppelspalt- Experiment mit einer Ortsmessung ein völlig anderes Ergebnis erhält: Statt des Interferenzmusters erhält man die Summenverteilung der beiden Einzelspaltmuster. Ohne Ortsmessung an den Spalten zeigt sich das Doppelspaltmuster.

Daraus formulieren die Autoren eine allgemeine Regel, 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.

Oft sagt man kurz: Ein Interferenzmuster kann nicht beobachtet werden, wenn die klassisch denkbaren Möglichkeiten unterscheidbar sind.

Damit kann der Wesenszug 4 „Komplementarität“ formuliert werden:

Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Möglichkeiten schließen sich aus.

Es wird danach darauf hingewiesen, dass der Umkehrschluss nicht gilt, d.h. wenn keine Zuordnung möglich ist, muss nicht automatisch ein Interferenzmuster auftreten. Als Beispiel wird angegeben, dass das Interferenzmuster ausbleiben kann, wenn die Werte für die Geschwindigkeiten der Quantenobjekte zu stark streuen (weil dementsprechend auch die de Broglie Wellenlänge streut).

Bei der Interpretation wird noch einmal betont: Dafür, ob nach dem Wesenszug der Komplementarität ein Interferenzmuster erscheint oder nicht, ist die gesamte Messapparatur entscheidend. Es kommt nicht darauf an, aus welchem Teil der experimentellen Anordnung die Zuordnungsinformation ausgelesen wird oder ausgelesen werden kann.

Aus diesen Argumenten kommen die Autoren zu *Folgerung 4*:

Die gesamte Messapparatur bestimmt das Versuchsergebnis.

Bereits die Möglichkeit zu einer Messung kann zu einem völlig anderen Versuchsergebnis führen. Die Möglichkeit zur Messung wirkt sich entscheidend auf den Zustand des Quantenobjekts aus.

Als weitere Beispiele werden die Streuung von Kohlenstoffkernen und die Braggreflexion von Neutronen am ^{13}C - Kristall angegeben.

Damit sind alle der vier Wesenszüge charakterisiert worden. In dem zitierten Buch werden auch noch weitere Aspekte zur quantitativen Behandlung der Quantenphysik besprochen, die nun aber nicht mehr besprochen werden sollen. Als einziger Punkt, der noch erwähnt werden soll, ist das Schlusskapitel zu benennen, indem einige interessante Vorschläge für den Einsatz in der Schule enthalten sind, die z.B. den Einsatz von Computersimulationen fordern, welcher aber noch in Kapitel 3 behandelt wird.

1.4 Zusammenfassung

Im ersten Unterkapitel wurden die allgemeinen Aspekte behandelt, die die Verständnisschwierigkeiten bei der Auseinandersetzung mit der Quantenphysik beschreiben. Als Hauptargument wurde dabei vorgebracht, dass die Verständnisschwierigkeiten ganz prinzipiell auftreten müssten, da die Anschauungen aus unserer Welt der großen Gegenstände nicht in die Welt der Quantenobjekte übernommen werden können.

In den beiden folgenden Unterkapiteln wurden zwei Konzepte zum Unterricht der Quantenphysik dargelegt. Im Beitrag zur Berliner Konzeption wurde nach einer kurzen Kritik der althergebrachten Unterrichtsabfolge ein neues Konzept vorgestellt, das vor allem aus einer anderen Abfolge der einzelnen Themen besteht, die durch didaktische Folgerungen untermauert und begründet ist. Diese Abfolge wird in diesem Konzept genau vorgegeben und wie bei einem Kochrezept beschrieben. Die bei der Erprobung des Konzepts durchgeführte Schülerbefragung zeigte einen Erfolg in den Punkten, die das Konzept ansprechen wollte.

Bei dem Konzept der vier Wesenszüge ist nicht so eine genaue Anleitung enthalten. Die vier Wesenszüge werden dargelegt und deren Bedeutung meist durch Varianten des Doppelspaltexperiments erklärt. Mittels der Interpretationen werden noch Folgerungen aus den Wesenszügen angeführt und Problematiken bzw. bestimmte Fragestellungen, die zu den einzelnen Wesenszügen auftreten, behandelt. Mit den weiteren Beispielen bekommt jeder, der basierend auf diesem Konzept unterrichten möchte, noch weitere Anregungen, eigene Vorstellungen zu verwirklichen.

Ein Punkt, der bei diesem Konzept problematisch werden könnte, ist die Zeiteinteilung. Bei diesem Konzept gehen die Autoren davon aus, dass zur Erarbeitung ungefähr vierzig Unterrichtseinheiten benötigt werden, ein Wert, der, wie sich in der folgenden Lehrerbefragung (Kapitel 2) zeigen wird, als unrealistisch zu betrachten ist. Allerdings kann man bei diesem Konzept auch in einer gekürzten Version sicherlich zu einer schönen Darstellungsform der Quantenphysik gelangen und die wesentlichen Punkte behandeln.

2. Lehrerbefragung zur Quantenphysik im Schulunterricht

2.1 Einleitung und Begründung der Methode

Um einen gewissen Einblick über das Unterrichten der Quantenphysik in der Schulpraxis zu erhalten, schien es mir sinnvoll mittels Interviews Lehrer und Lehrerinnen zu befragen. Denn wer sollte mehr dazu erzählen können, was im Schulunterricht wirklich passiert, als die ausführenden Personen selbst.

Der Grund, warum ich als Methode der Befragung Interviews gewählt habe, ist relativ leicht zu erklären. Zur Befragung der LehrerInnen standen für mich zwei Methoden zur Auswahl. Die eine war, mittels Fragebögen mich interessierende Fragen zu beantworten, die andere war mittels von mir selbst geführten Interviews.

Bei der Methode der Fragebögen sah ich einige Probleme. Zuerst einmal können immer wieder Probleme mit dem Verständnis der gestellten Fragen auftreten, wenn die Befragten den Fragebogen bekommen. Diese Probleme können bei einem Interview durch einfaches Nachfragen gelöst werden. Außerdem sind die gegebenen Antworten natürlich niemals so lange und ausführlich wie bei einem Interview.

Deswegen habe ich die Methode des Interviews gewählt, da hier das persönliche Feedback von beiden Seiten viel besser ins Spiel gebracht werden kann. Meiner Meinung nach kamen viel mehr interessante Aussagen zustande, auch solche, auf die die ursprünglichen Fragen gar nicht gezielt hatten, aber trotzdem sehr aufschlussreich waren. Denn in den Interviews kann man durch gezieltes Nachfragen und vor allem durch Wiederholen von Aussagen, die vom Interviewten gerade getätigt wurden, das Gespräch in die eine oder andere Richtung lenken, je nachdem über welchen Aspekt man mehr erfahren möchte.

Durch die Anzahl der Interviews- es wurden 14 LehrerInnen aus vier Schulen befragt- halte ich die qualitative Methode für angebracht. Trotzdem scheint es mir so, dass bei sehr vielen Aussagen sehr wohl Schlüsse auf die Allgemeinheit möglich sind. Denn wenn sich bestimmte Aussagemuster immer wieder wiederholen, dann ist das Schließen auf die Allgemeinheit auch bei einer geringen Anzahl von Interviews durchaus legitim.

Ein weiterer wichtiger Aspekt stellte die Anonymität der Interviews dar, da durch den Hinweis auf dieseltige das Gesprächsklima sich merklich entspannte und damit meiner Meinung nach viel mehr Aussagen über die teilweise bestehende Problematik des Unterrichts der Quantenphysik zustande gekommen sind.

Ein weiterer wichtiger Punkt war, dass die Länge der Interviews in einem Zeitrahmen von ca. 15- 20 Minuten angesetzt war und somit alle LehrerInnen, die von mir angesprochen wurden, sich die Zeit für die Befragung genommen haben. Bei einer längeren Dauer der Befragung hätten sicherlich einige der LehrerInnen nicht die Zeit für das Interview gehabt, da die erste Frage immer nach der Dauer des Interviews war und alle sehr erleichtert waren, als sie von der eher kurzen Zeitspanne der Befragung erfuhren.

2.2 Ziele der Befragung

Als Ziele der Befragung haben sich vor allem Aspekte der Unterrichtsgestaltung und der im Unterricht verwendeten Begriffe herauskristallisiert. Dazu musste natürlich erstmal gefragt werden, ob überhaupt die Quantenphysik üblicherweise in der achten Klasse von dem/der LehrerIn unterrichtet wird. Um in diesem Punkt von Anfang an Klarheit zu schaffen, geschah dies auch immer gleich am Beginn des Interviews. Die genaue Abfolge der Fragen kann man auch dem Anhang A entnehmen, in dem die Interviewfragen angeführt sind.

Bei der Erstellung der Fragen für die Interviews stand für mich als erster Punkt einmal die Frage, welche Begriffe der Quantenphysik den Lehrern und Lehrerinnen denn besonders wichtig sind und welche sie für eher entbehrlich im Schulunterricht halten. Dies stellt meiner Meinung nach einen ganz wichtigen Punkt dar, denn wenn man aus dem Studium kommt, kann man sich noch nicht so richtig vorstellen bzw. beurteilen, wie mit den Begriffen der Quantenphysik im Unterricht umgegangen wird. Außerdem schien es mir interessant, ob die Gewichtung von den meisten Lehrern annähernd gleich vorgenommen wird, oder ob es sehr große Unterschiede darin gibt, welche der Begriffe als wichtig und unterrichtenswert erachtet werden. Wenn solche Unterschiede auftreten, so wäre es auch ein weiterer interessanter Aspekt, ob es aus den Antworten heraus auch ersichtlich oder zumindest vermutbar wird, warum diese Unterschiede auftreten. Meiner Meinung nach

wären da verschiedene Motive möglich: Unterschiedliches Vorwissen, persönliche Vorlieben bzw. Aversionen, Zeitdruck usw.

Als weiteren Punkt, der der ersten Zielsetzung nahe kommt, stellte sich die Frage, welche Begriffe nach Meinung der unterrichtenden Lehrer und Lehrerinnen ein/e SchülerIn nach Beendigung des Unterrichts in Quantenphysik in eigenen Worten erklären können soll. Diese Frage ist vor allem deshalb interessant, da auch hier noch einmal die Gewichtung der Begriffe auftritt, allerdings in einer ganz anderen Richtung. Denn diese Fragestellung geht vor allem in die Richtung, welche Begriffe von dem/der betreffenden LehrerIn für den/die SchülerIn als so verständlich betrachtet werden, dass sie ein Schüler in eigenen Worten wiedergeben kann und welche Begriffe nur in der von dem/der Unterrichtenden vorgetragenen Form für einen Schüler erklärbar sind. Diese Problematik zeigt sich natürlich in allen Bereichen der Physik, doch gerade in der Quantenphysik wird durch die große Abstraktheit der Begriffe die Schwierigkeit des Erklärens in eigenen Worten besonders deutlich. Denn gerade durch die Verwendung einer nicht exakten Sprache können erhebliche Schwierigkeiten im richtigen Erfassen der einzelnen Begriffe auftreten und somit falsche Vorstellungen über die Quantenphysik entstehen.

Deshalb war es ein weiteres Ziel der Befragung, wie und mit welchen Materialien die Unterrichtsvorbereitung auf das doch schwierige Kapitel der Quantenphysik erfolgt. Gerade bei den Materialien gibt es ja heute durch die neuen Medien mehr Möglichkeiten als noch vor einigen Jahren und es schien durchaus von Interesse, wie gut diese Möglichkeiten schon genutzt werden. Aber auch, ob durch Bücher oder Zeitschriften die Information über die Weiterentwicklung der modernen Physik sich angeeignet wird und in den Unterricht eingebaut wird, war ein weiterer Aspekt, der mit dieser Fragestellung abgedeckt werden sollte.

Die Frage, wo sich die Lehrer und Lehrerinnen denn das Wissen zur Quantenphysik erworben haben, sollte ein Bild über den Wissenserwerb der Befragten bringen und vor allem, ob die Möglichkeit der Fortbildung genutzt wird. Ferner, ob aus der Sicht der Lehrer und Lehrerinnen die Fortbildung, ihrer Meinung nach, etwas zur Verbesserung des eigenen Unterrichtens bzw. zur Erweiterung ihrer Möglichkeiten in der Unterrichtsgestaltung beigetragen hat. Ein weiterer Beweggrund für das Besuchen einer Fortbildung könnte aber

auch eine Bereicherung ihres persönlichen Hintergrundwissens sein und dem damit verbundenen besseren Verständnis der grundlegenden und der moderneren Begriffe.

Ein weiterer Fixpunkt in der Befragung sollte die Frage nach den verwendeten Medien im Unterricht der Quantenphysik sein. Diese Frage wurde in zwei Teilfragen aufgeteilt, nämlich in eine, die allgemein nach den verwendeten Medien fragt, und die andere, die speziell im Hinblick auf den Einsatz von Multimediamaterial im Quantenphysikunterricht gestellt ist. Dass in einer Befragung betreffs der Unterrichtsgestaltung die Frage nach den verwendeten Medien nicht fehlen sollte, liegt meiner Meinung nach auf der Hand, wenngleich man sicherlich nicht anhand der Anzahl der verwendeten Medien auf die Qualität des Unterrichts schließen darf. Allerdings ist es sicherlich erfahrungswert, welche Medien bevorzugt werden, wenn so ein komplexes Thema, wie es die Quantenphysik darstellt, dargelegt werden soll.

Das spezielle Nachfragen nach dem Verwenden von Multimediaanwendungen ist gerade in der heutigen Zeit aufschlussreich, da ja immer wieder verlangt wird, dass im Unterricht allgemein vermehrt die neuen Medien forciert werden sollen. Es sind ja nun schon alle Schulen mit einem Internetanschluss ausgerüstet und dieser Trend zur Hinwendung zu den neuen Medien wird durch die Schaffung so genannter Laptopklassen verstärkt. Was man aber dabei bedenken sollte, ist, dass alleine mit der Anschaffung der Laptops die Arbeit noch nicht getan ist. Denn nun sollten die Schüler auch davon profitieren, indem man die Vorteile der neuen Möglichkeiten ausnützt. Dazu ist aber notwendig, dass man geeignetes Material zur Verfügung hat, um es dann entsprechend zur Anwendung zu bringen, damit der Laptop nicht nur zum Mitschreiben verwendet wird, denn dann ist der Idee ,die dahinter steckt, meiner Meinung nach nicht entsprochen.

Ein weiterer Aspekt war, ob die befragten Lehrer und Lehrerinnen einem Schüler ein Buch zur Quantenmechanik empfehlen könnten. Die Frage zielt in erster Hinsicht nicht darauf, ob den Lehrerinnen und Lehrern das eine oder andere Standardlehrbuch zur Quantenphysik bekannt ist, sondern zielt eher mehr in die Richtung, ob ihnen ein Werk geläufig ist, das ihrer Meinung nach für die Schüler verständlich ist und trotzdem die Grundideen erklärt. Denn gerade in der Quantenphysik werden so viele interessante und spannende Fragestellungen aufgeworfen, dass sicherlich öfters manche Schüler sich selbst weiterinformieren wollen. Gerade dann ist es wichtig, aus der großen Anzahl von Werken

dem Schüler ein oder mehrere Bücher vorschlagen zu können, die sowohl auf seine Interessen als auch auf sein Vorwissen abgestimmt sind. Denn alleine durch den sicherlich eingeschränkten Zeitrahmen im Unterricht wird der Wissensdurst einiger Schüler nicht zu stillen sein, aber er kann durch eine gute Anleitung sicherlich schneller und effektiver gelöscht werden.

Ebenfalls eine Fragestellung, die mit dem Unterricht der Quantenphysik verbunden ist, war, ob seitens der Lehrer und Lehrerinnen Wünsche zur Verbesserung des Unterrichtens der Quantenphysik vorhanden sind, vor allem in Bezug auf Materialien, mehr Multimediaunterstützung und Lehrerfortbildung. Die Antworten sollten meiner Meinung nach sicherlich aufschlussreich sein, in welchen dieser Teilgebiete die Unterrichteten selbst einen Nachholbedarf sehen oder sich mehr Unterstützung von Einrichtungen außerhalb der Schule erhoffen. Außerdem können durch diese Frage auch andere Wünsche der Lehrer und Lehrerinnen offenbart werden, auf die die Frage eigentlich gar nicht gezielt hat, aber aus denen vielleicht auch einige interessante Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der natürlich nicht fehlen darf, ist die Zeiteinteilung im Unterricht der Quantenphysik. Zu diesem Punkt werden zwei Fragen gestellt, nämlich eine, die die Anzahl der Unterrichtseinheiten feststellen soll und die andere, wann im Schuljahr dieses Kapitel durchgenommen wird. Die erste Antwort zeigt vor allem, wie viel Zeit die jeweiligen Lehrer und Lehrerinnen gewillt sind, der doch schwierigen Thematik der Quantenphysik zu opfern. Denn meiner Meinung nach darf man gerade beim Erarbeiten der Grundideen der Quantenphysik einen gewissen Zeitrahmen nicht unterschreiten, um den Schülern Zeit zu geben, sich mit den anfangs doch ganz neuen Denkmodellen anzufreunden und zu recht zu finden. Die andere Frage ist auch von Bedeutung, da es in der achten Klasse schon einen wesentlichen Unterschied ausmacht, zu welchem Zeitpunkt im Schuljahr welches Thema unterrichtet wird. Meiner Meinung nach wird es im zweiten Semester der achten Klasse sicher immer schwieriger, die Aufmerksamkeit der Schüler auf das Thema Quantenphysik zu bringen, wenn das Schreckgespenst Matura immer näher kommt. Außerdem wird die Zeit auch immer knapper für die Schüler, sich vielleicht auch außerhalb der Schule damit zu beschäftigen, da in dieser Zeit sicherlich mehr für die bevorstehenden Prüfungen gearbeitet wird.

Nachdem schon angesprochen wurde, dass die Schüler sicherlich Zeit brauchen, um sich an die Thematik zu gewöhnen, ist natürlich eine weitere Frage, wo denn bei den Schülern aus der Sicht der Lehrer und Lehrerinnen die Probleme und Fragen in der Erarbeitung der Quantenphysik auftreten. Diese Frage ist außerordentlich wichtig, um zu sehen, wo denn die in der Praxis stehenden Lehrer und Lehrerinnen die Probleme der Schüler sehen und welche Fragen ihnen gestellt werden. Gerade hier kann man vielleicht im Detail erkennen, bei welchen Themen denn die größten und häufigsten Verständnisprobleme auftreten. Meines Erachtens nach ist auch gerade das Fragen stellen seitens der Schüler im Unterricht der Quantenphysik ein ganz wichtiger Bestandteil der zum Verständnis wesentlich beiträgt, da sicherlich nicht alles auf Anhieb von allen verstanden wird, ja sogar verstanden werden kann. Weiters kann überlegt werden wie denn die Probleme der Schüler gelöst werden können oder wie der Unterricht gestaltet werden muss, damit manche Probleme gar nicht auftreten.

Mit der letzten Fragestellung nach sonstigen Wünschen seitens der Befragten kann man Wünsche herausfinden, die noch nicht durch die vorherigen Fragen zu Tage gekommen sind. Vielleicht brennt manchen der Befragten ja ein Thema unter den Fingernägeln, das unbedingt noch angesprochen werden soll. Oder es sind ihnen noch einige Aussagen zu manchen der Fragestellungen im Laufe des Interviews eingefallen, die sie zum Schluss noch nachreichen wollen.

2.3 Ergebnisse der Befragung

Die Auswertung der Ergebnisse lässt natürlich auf Grund der geringen Anzahl der Befragten nicht einen Schluss auf die Allgemeinheit zu, aber man kann ja auch anhand einer qualitativen Analyse einige interessante Aussagen gewinnen.

Bei der ersten Frage, ob der/die Befragte das Thema Quantenphysik überhaupt üblicherweise in der achten Klasse unterrichtet, haben 12 der 14 Befragten mit einem klaren ja geantwortet. Dies ist eine meiner Meinung nach erfreulich hohe Anzahl, denn auch die zwei anderen Befragten schlossen den Unterricht der Quantenphysik nicht kategorisch aus, sondern gaben vor allem den Zeitmangel im Schultyp des Gymnasiums als Grund an.

Aber vielleicht lässt man besser die Befragten selbst sprechen:

L: Ob Quantenphysik in der achten Klasse unterrichtet wird, hängt meiner Meinung damit zusammen, einmal vom Schultyp. In der sechsten Klasse haben wir drei Wochenstunden, in der siebenten zwei und in der achten zwei Wochenstunden. Der Unterschied zum RG ist, dass in der fünften Klasse noch zwei Stunden dazukommen. Jetzt ist es so, also in der achten Klasse, kann ich jetzt ganz aktuell sagen, zur so genannten modernen Physik oder Physik des 20. Jahrhunderts, also, zur Relativitätstheorie kommen wir meistens schon noch, vor allem im RG, also richtige Quantenphysik in der achten Klasse im Gymnasium geht sich meistens nicht mehr aus. Das ist einfach zu wenig Zeit und wir wollen ja doch Schülerversuche z.B. machen. Nur durch den Stoff durchhetzen und sich nirgends auskennen gescheit, gar nix gescheit machen, hat meiner Meinung nach auch keinen Sinn, da ist eher so, dass man einmal in der sechsten Klasse einen Schülerversuch macht... Im RG machen die Kollegen schon Quantenmechanik, im Gymnasium im Zusammenhang mit dem Atombau zu Beginn der sechsten Klasse im Gymnasium oder in der fünften Klasse im RG, aber natürlich auf einem einfachen Niveau...

Bei dieser Antwort wird deutlich, dass der/die Befragte als hauptsächlichen Grund für das Auslassen des Themas Quantenphysik die fehlende Zeit im Schultyp Gymnasium anführt. Dieses Argument wird dadurch untermauert, dass es nichts bringt durch den Stoff durchzuhetzen und auch Schülerversuche gemacht werden sollen. Meiner Meinung nach sind dies alles sehr gute Argumente, aber es sollte, trotz oder gerade wegen dieser Argumente, möglich sein, den Schülern einen, wenn auch kleinen, Einblick in eines der interessantesten und modernsten Themen der Physik zu ermöglichen. Klarerweise macht das Durchhetzen durch den Stoff sicher keinen Sinn, dennoch mit ein bisschen Mut zur Lücke kann man sicher zumindest ein paar Stunden für die Quantenphysik freimachen. Dies soll überhaupt nicht als Kritik an der befragten Lehrperson verstanden werden, bei der man auch hervorheben sollte, dass er/sie dazu gestanden ist, im Gymnasium keine Quantenphysik zu unterrichten.

Die Argumente waren bei der zweiten Lehrperson sehr ähnlich, auch hier war der Zeitmangel das bestimmende Moment, die Quantenphysik nicht zu unterrichten. Es wurde zwar hier bedauert, aber es schien auch nicht wirklich so, dass es nur einmal passiert ist, sondern so, dass die Quantenphysik nur dann unterrichtet wird, wenn ein bisschen Zeit überbleibt. Eigentlich schade, wenn die Quantenphysik nur als Pausenfüller verwendet wird und nicht als wichtiger Stoff, der zumindest in den Grundzügen als wissenswert für einen Maturanten angesehen wird.

Dies wird sich ja hoffentlich mit dem neuen Lehrplan, der ab dem nächsten Schuljahr 2004/2005 eingeführt wird, ändern, denn in diesem wird ja zwingend vorgeschrieben sein, dass zur Unterstützung des Unterrichts aus Chemie zu Beginn der 7. Klasse das Atommodell in moderner Sichtweise zu behandeln ist. Damit werden hoffentlich die Lehrer und Lehrerinnen, die bis jetzt noch keine Quantenphysik unterrichten, auch motiviert werden, zumindest ein paar Grundbegriffe und Grundideen der Quantenphysik zu vermitteln.

Wertung der einzelnen Begriffe

Die Wertung der einzelnen Begriffe sollte in einer Skala von 1-5 erfolgen. Dabei hätte man vielleicht eine statistische Auswertung durchführen können. Diese wird aber aus zwei Gründen nicht erfolgen. Erstens gaben viele der Befragten keine „Noten“ und damit wird es schwierig, statistische Aussagen zu treffen. Zweitens waren die von manchen Befragten getroffenen Aussagen zu den einzelnen Begriffen so interessant und aufschlussreich, dass sie zu den meisten Begriffen einzeln besprochen werden. Dabei soll auch versucht werden, diese einzelnen Begriffe auch aus der Sicht von Fachdidaktikern zu beleuchten, um vergleichen zu können, wie sehr die theoretischen Konzepte von der Unterrichtspraxis abweichen oder inwiefern schon nach neueren Erkenntnissen der Fachdidaktik unterrichtet wird.

Die Unschärferelation

Bei der Unschärferelation handelt es sich um einen der sehr wichtigen Begriffe in der Quantenmechanik, der meines Erachtens unbedingt nötig ist, um das Verständnis des Wesens der Quantenmechanik den Schülern überhaupt zu ermöglichen.

Diese Meinung wird eigentlich von allen befragten Lehrern geteilt, denn es gab bei dieser Frage keine schlechtere Bewertung als 2 und überwiegend wurde eine 1 gegeben. Alle Lehrer schätzten die Unschärferelation als unterrichtenswert ein. Damit hat die Unschärferelation wohl einen Fixplatz im Unterricht der Quantenphysik. Vielleicht sollte man sich eine Anekdote in den Unterricht einbauen, wie sich Heisenberg gefühlt hat, als er

diese Theorie gefunden hatte, denn der menschliche Aspekt kommt in vielen Schilderungen viel zu kurz und kann meiner Meinung nach im Unterricht einiges an Interesse wecken.

Die Unschärferelation wurde im Jahre 1925 von Heisenberg im Alter von 23 Jahren aufgestellt. Er war zu dieser Zeit gerade auf der Insel Helgoland, wo er einen Anfall von Heufieber auskurierte und beschrieb seine Gefühle bei der Entdeckung in folgender Weise.

...Im ersten Augenblick war ich zutiefst erschrocken. Ich hatte das Gefühl, durch die Oberfläche der atomaren Erscheinungen hindurch auf einen tief darunter liegenden Grund von merkwürdiger innerer Schönheit zu schauen, und es wurde mir fast schwindlig bei dem Gedanken, dass ich nun dieser Fülle von mathematischen Strukturen nachgehen sollte, die die Natur dort unten vor mir ausgebreitet hatte. Ich war so erregt, dass ich an Schlaf nicht denken konnte....

(Heisenberg 1979, S.28)

Wie soll man nun die Unschärferelation in eigenen Worten am besten begreiflich machen? Dies ist nicht unbedingt ein ganz so leichtes Unterfangen, was man vor allem daran erkennt, dass die Unschärferelation in vielen populären Darstellungen in ihrem Wesen nicht ganz korrekt beschrieben wird, wie auch von Weizsäcker kritisiert und das Wesen der Unbestimmtheitsrelation so darstellt:

Diese Relation gibt gerade an, was man dann als beobachtbar und als nicht beobachtbar ansehen muss, wenn man die Quantenmechanik als richtig unterstellt. Die logische Folgerung läuft hier genau hier in genau entgegengesetzter Richtung, als man es populär darzustellen pflegt. Die Folgerung lautet nicht: „Ort und Impuls können nicht zugleich beobachtet werden, also existieren sie nicht zugleich.“ Dies wäre keine logische gültige Folgerung, es wäre schlichter Unsinn. Die Folgerung lautet vielmehr: „In der Quantenmechanik gibt es keine Zustände, in denen Ort und Impuls zugleich existieren, also muss es unmöglich sein sie im Einklang mit den Gesetzen der Quantenmechanik gleichzeitig zu messen.“

(von Weizsäcker 1999, S.307 f.)

Ein anderer Zugang zum Verständnis der Unbestimmtheitsrelation, der auch im Unterricht wahrscheinlich leichter vorzubringen ist, ist die sehr gut gelungene Darstellung der Tatsachen in der Form von Hey und Walters, die anhand eines Beispiels die praktische Bedeutung der Unschärferelation illustrieren wollen:

Wie lässt sich dieser Zusammenhang verstehen? Um den Ort des Teilchens sehr genau zu bestimmen, benötigt man Licht äußerst kurzer Wellenlänge, da die minimale Entfernung, innerhalb der wir das Teilchen lokalisieren können, in etwa durch die Wellenlänge des Lichts gegeben ist. Hier beginnt nun ein wahrer Teufelskreis. Kurzwelliges Licht ist Licht hoher Frequenz, und diese Frequenz wiederum bestimmt die Energie der Photonen – nach einer erstmals von Max Planck aufgestellten Formel. Die Beziehung ist sehr einfach und besagt, dass Photonenenergie und Lichtfrequenz einander proportional sind...

Für unser Problem der hochpräzisen Ortsmessung, die den Einsatz von hochfrequentem Licht (mit großem f) erfordert, bedeutet dies, dass die auftreffenden Photonen eine sehr hohe Energie besitzen und dem Quantensystem einen entsprechend kräftigen Stoß – das heißt Impuls – erteilen. Wenn wir umgekehrt auf einen sehr genauen Wert des Impulses aus sind, dürfen wir dem System nur einen kleinen Stoß übertragen und müssen daher, wegen der Plankschen Beziehung, mit niedrigfrequentem Licht arbeiten. Da niedrige Frequenz große Wellenlänge bedeutet, müssen wir jetzt aber eine große Unsicherheit bei der Ortsmessung in Kauf nehmen!

(Hey/Walters 1998, S.38f.)

Mit dieser Erklärung kann man sicherlich zum Verständnis seitens der Schüler einiges beitragen, da alle verwendeten Formeln und Zusammenhänge auch zum Standard einer Einführung in die Quantenphysik gehören und damit die Schüler nicht bei der Erklärung mit neuen Formeln konfrontiert werden müssen, da, so glaube ich, mit jeder zusätzlichen Formel der Anteil der Schüler sinkt, der sich damit auseinandersetzt.

Natürlich könnte man auch eine Herleitung darlegen, die ähnlich zu der ist, die von Kuhn in einem Artikel in einem fachdidaktischen Sammelband des Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften vorgeschlagen wird, doch wird bei der geringen Stundenzahl, die man in der Praxis zur Verfügung hat, der Erfolg nicht gerade leicht zu bewerkstelligen sein. Es könnte aber durchaus für interessierte Schüler oder für das Wahlpflichtfach einen lohnenden Zugang darstellen, da man auch dann die notwendigen Grundlagen erarbeiten kann. (Kuhn, Wilfried: Quantenmechanik- Eine wissenschaftstheoretisch reflektierte Analyse ihres ideengeschichtlichen Entwicklungsprozesses. In: Fischler 1992, S.48)

Das Bohr'sche Atommodell

Bei der Frage nach dem Bohr'schen Atommodell handelt es sich wohl um einen Dauerbrenner in der didaktischen Diskussion, der nach all den Jahren immer noch sehr aktuell ist. Das zeigt sich auch daran, dass es auch unter den Fachdidaktikern sowohl Befürworter als auch strikte Gegner des Modells gibt.

Bei den Befragten gingen die Meinungen über die Bewertung der Wichtigkeit des Bohr'schen Atommodells auch weit auseinander. Die Benotung, wenn sie erfolgte, war zwar ähnlich zu der der Unschärferelation, also zwischen den Noten eins und zwei angesiedelt, doch häuften sich die Bemerkungen gerade bei dieser Frage sehr.

Man muss sagen, dass sich bei der Hälfte der Befragten keine Zweifel eingeschlichen haben, ob man das Bohr'sche Atommodell unterrichten soll und anhand der Benotung sieht man, dass dieser Anteil das Modell als durchaus wichtig ansieht.

Eine des öfteren vorgebrachte Meinung ist jene, dass das Bohr'sche Atommodell in der Chemie zur genüge abgedeckt werde und daher nicht mehr in der Physik durchgemacht werden müsse. Stellvertretend hier zwei Aussagen der Befragten:

Hat ein geringes Gewicht, das kennen sie nämlich. Weil es in der Chemie sowohl in der siebten als auch achten Klasse behandelt wird.

Alles andere wie das Bohr'sche Atommodell, das überlasse ich eher der Chemie.

Es wird zwar nicht als unwichtig oder nicht sinnvoll dargestellt, aber auch nicht als so wichtig, dass man es noch mal aus der Sicht eines Physiklehrers/In zu erklären bräuchte, die Erklärung wird von Seiten der Chemie erwartet und findet dann auch anscheinend statt.

Eine Aussage gehört auch noch erwähnt, da sie die einzige war, die sofort betonte, dass das Bohr'sche Atommodell, zumindest physikalisch sicherlich nicht der Weisheit letzter Schluss ist:

L: Das Bohr'sche Atommodell dann nur im Zusammenhang mit dem Quantenmechanischen, um die Unterschiede herauszuarbeiten.

Mit dieser Antwort könnten auch viele Fachdidaktiker und Physiker sehr gut leben, unter Ihnen auch Prof. Pietschmann, der ja in seinem Buch *Quantenmechanik verstehen* über das Bohr'sche Atommodell folgendes schreibt:

*...Es kann nicht genug betont werden, ..., das Bohrsche Atommodell hat daher lediglich **historische Bedeutung**, es beschreibt in keiner Weise die tatsächliche Physik des Atoms!*

Und als Fußnote fügt er noch hinzu:

Meines Erachtens muss dies im Schulunterricht sehr deutlich dargestellt werden! Wenn Atomphysik über das Bohr'sche Atommodell hinaus nicht gelehrt werden kann, dann ist es wohl besser, auch dieses wegzulassen.

(Pietschmann 2003, S.25)

Die zuvor gegebene Antwort spiegelt die Meinung von Prof. Pietschmann wieder, denn das Bohr'sche Atommodell wird von diesem(r) LehrerIn nur dazu verwendet, um zu zeigen, an welchen Stellen es im Vergleich mit dem modernen Atommodell nicht mithalten kann und falsch ist. Dies ist meiner Meinung nach ganz wichtig, denn wie man anhand der Befragung erkennt, wird, auch wenn man das Bohr'sche Atommodell nicht unterrichtet, jeder Schüler in der Chemie mit diesem anschaulichen Modell vertraut gemacht und es führt sicherlich zu Verwirrungen, wenn in Physik und Chemie zwei verschiedene Modelle zum Aufbau der Atome als richtig dargestellt werden. Noch dazu, wo das vermeintlich so einfache und anschauliche Modell schlicht und einfach falsch ist.

Ob das Bohr'sche Atommodell überhaupt in den Unterricht einbezogen werden sollte, dazu gibt es auch unter den Fachdidaktikern ganz unterschiedliche Meinungen. Dies wird auch von Helmut Fischler in dem von ihm herausgegebenen Band *Quantenphysik in der Schule* in seinem Beitrag dargestellt. Er weist in diesem Aufsatz darauf hin, dass obwohl schon vor über siebenzig Jahren dieses Atommodell wissenschaftlich überwunden wurde, die Präsenz in Lehrplänen, Schulbüchern und Unterrichtsstunden immer noch ungebrochen ist. Er stellt die Frage, warum es so attraktiv ist, dieses Modell zu verwenden und wie die Begründungen für seine Berücksichtigung lauten.

Er gibt auch sofort die am häufigsten genannten Argumente für die Verwendung des Bohr'schen Atommodells an, die in der fachdidaktischen Diskussion vorkommen. Als erstes Argument wird angeführt, dass die Schüler nach Möglichkeiten suchen, um sich die

abstrakten Inhalte zu veranschaulichen. Das Bohr'sche Atommodell sei eine willkommene Verständnishilfe sowohl in naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächern als auch in den populärwissenschaftlichen Darstellungen, es gehöre zum „common sense“ der naturwissenschaftlich Gebildeten. Ein Infragestellen käme einem Kampf gegen Windmühlen gleich.

Als zweites Argument wird angeführt, dass die Beliebtheit dieses Modells aus seiner Leistungsfähigkeit resultiere, so fragt sich Höfling im gleichen Band: Welches Modell lässt so viele erfolgreiche Deduktionen zu wie dieses?

Natürlich wird auch noch ein anderes Argument ins Spiel gebracht. Die Bedeutung von Modellen für den Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Physik sei mit diesem Modell bzw. mit der Abfolge der verschiedenen Atommodelle besonders überzeugend zu demonstrieren. Das schließe die Erörterung der Mängel und Grenzen des Modells ein.

Zum Abschluss wird auch noch das Argument vorgebracht, dass Kenntnisse über die historische Entwicklung ein wichtiger Bestandteil der allgemeinen Zielsetzungen für den Physikunterricht seien. (Fischler, Helmut: Anschaulichkeit oder Abstraktion- Grundlagen oder Anwendungen? In: Fischler 1992, S.12)

Im gleichen Artikel wird auch sofort angeführt, dass es an Erwiderungen auf diese Argumente in der fachdidaktischen Diskussion nicht fehlt. In diesen wird z.B. darauf hingewiesen, dass das Bohr'sche Atommodell, aus größerer zeitlicher Distanz betrachtet, eine sehr kurzlebige Zwischenstufe auf dem Wege zur Quantenphysik war und dass die Erklärungsmächtigkeit sehr begrenzt ist. Die auf die Schüler bezogenen Entgegnungen stellen vor allem Lernprobleme in den Vordergrund, die damit verbunden sind, dass den Schülern zunächst die Leistungsfähigkeit eines anschaulichen Modells demonstriert wird, das am Ende der Unterrichtssequenz in der Regel mit nur recht vagen Bemerkungen in Frage gestellt wird.

Fischler gibt weiter zu bedenken, dass die (schul-) physikalische Stärke des Modells zugleich seine didaktische Schwäche ist:

Wie sieht nämlich die Lernsituation für einen physikalisch durchschnittlich interessierten Schüler aus, der im Unterricht in aller Ausführlichkeit den ersten Teil des historischen Weges in die Quantenphysik kennen lernt, für den zweiten aber nur eine Andeutung erhält? Die Berechnung von (Wasserstoff-) Frequenzen mit Hilfe der Bohr'schen Annahmen und die Übereinstimmung dieser Werte mit den experimentellen Ergebnissen verfestigen ein Bild vom Atom, das aufgrund vielfältiger Einflüsse (z.B. im vorangegangenen Unterricht oder über die populärwissenschaftliche Literatur) schon längst präsent ist. Neu sind allenfalls die Elektronen- Sprünge, aber die kann sich der Schüler auch noch gut vorstellen, sie sind mit den Grundannahmen des Modells durchaus vereinbar.

Am Ende eines langen Weges, auf dem das anschauliche Modell durch die mathematische Durchdringung und experimentellen Bestätigungen vielfache Unterstützung erfahren hat, erhält der Schüler den Lehrerhinweis, dass das Modell eigentlich überholt sei und schon vor über sechzig Jahren bekannten Phänomene nicht erklären könne. Die Darstellung der gültigen quantenphysikalischen Grundlagen sei aber auf schulischem Niveau zu schwierig. Dass man nach dieser Theorie nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten angeben könne und es daher gar nicht sinnvoll sei, von Elektronen – Bahnen zu reden, wird vom Schüler kaum angemessen erfasst werden können, zu stark hat der Unterricht bisher an der Ausprägung eines anschaulichen, mit den Alltagserfahrungen verträglichen Bildes mitgestaltet.

(Fischler, Helmut: Anschaulichkeit oder Abstraktion- Grundlagen oder Anwendungen? In: Fischler 1992, S.12 f.)

Meiner Meinung nach ist die Verwendung des Bohr'schen Atommodells mehr als problematisch, da es ja das letzte „anschauliche“ Modell ist und damit viele Schüler sich daran anklammern werden, weil man immer bemüht ist, sich auch etwas visuell vorzustellen. Wenn man schon das Bohr'sche Atommodell unbedingt im Unterricht verwenden möchte, dann eher nur als historische Bemerkung, wobei auch hier zu beachten ist, dass die Vorstellung des Modells erst nach der Darlegung der Quantenphysik erfolgt, damit die Schüler nicht im Bohr'schen Modell hängen bleiben.

Dass das Bohr'sche Atommodell für viele Lehrkräfte nichts an Schlagkraft verloren hat, wurde anhand der Bewertung in den Interviews recht deutlich. Nur ein Einziger wollte es nur noch im historischen Kontext verwenden. Dass das Modell ganz tief verwurzelt ist, zeigt auch die Aussage jener Lehrkraft, die schon vorher zitiert wurde, nämlich in dem Punkt, ob er/sie überhaupt denn Quantenmechanik unterrichtete. Dies wurde wie vorher

schon zitiert im Falle einer Gymnasiums-Klasse verneint, aber es wurde ein interessanter Zusatz hinzugefügt:

.... Im RG machen die Kollegen schon Quantenmechanik, im Gymnasium im Zusammenhang mit dem Atombau zu Beginn der sechsten Klasse im Gymnasium oder in der fünften Klasse im RG, aber natürlich auf einem einfachen Niveau. Bohr'sches Atommodell machen wir ganz sicher.

Es zeigt sich an dieser Aussage, dass das Modell bei vielen Unterrichtenden ganz tief verwurzelt ist, was gar nicht kritisiert werden soll, denn es ist des Öfteren so, dass man in seiner Vorstellung in das Bohr'sche Modell zurückfällt, nur sollte man sich vielleicht überlegen, ob es nicht besser wäre, wenn man den Schülern gar keine Möglichkeit geben würde, in ein falsches Modell zurückzufallen. Vielleicht wären dann viele Probleme, die die Schüler und in späterer Folge auch Studenten bei der Erarbeitung der Quantenmechanik bekommen, schneller oder zumindest einfacher zu lösen, wenn man nicht auch noch den Ballast eines falschen und schon über 70 Jahre alten Modells mitschleppen muss.

Das Korrespondenzprinzip

Das Korrespondenzprinzip ist ebenfalls von Bohr aufgestellt worden. Die folgende Formulierung aus dem Buch von Hans-W. Kirchhoff bringt das Prinzip auf den Punkt:

...Diesen Anschluss an die klassische Mechanik verallgemeinerte Bohr zu einer Forderung, an der sich seitdem jede Hypothese aus der Mikrophysik messen lassen muss: Geht man in Gedanken von der mikrophysikalischen Dimension des Modells zu Dimensionen der Makrophysik über, so müssen die mit Hilfe des Modells gewonnenen Aussagen in die in der Makrophysik geltenden Gesetze übergehen.

(Kirchhoff 2001, S.69)

Anhand der Aussage kann man schon erkennen, dass es sich hier um ein ebenfalls wichtiges Prinzip der Quantenmechanik handelt, doch im Gegensatz zu den ersten Begriffen wird das Korrespondenzprinzip von der überwiegenden Mehrheit als nicht sehr wichtig eingestuft.

Von den Befragten gab nur einer oder eine die Note 1. Die überwiegende Mehrheit gab die Noten 3 und 4. Diese Wertung ist auch am folgenden Zitat nachvollziehbar:

Auf das Korrespondenzprinzip kann ich gar nicht eingehen ...

Dies ist eigentlich sehr schade, da meiner Meinung nach gerade dieses Prinzip sicher auch zum Verständnis der Theorie einiges beitragen kann. Außerdem, so glaube ich, ist dieses Prinzip auch gut im Unterricht zu verwenden, da damit den Schülern ein bisschen das Gefühl weggenommen werden kann, dass alles, was sie bis jetzt gelernt haben, eigentlich falsch war, denn dieses Gefühl sollte meiner Meinung nach gar nicht in den Schülern entstehen. Dem ist ja nicht so und gerade dieses Prinzip führt uns dies nochmals deutlich vor Augen und kann den Schülern vielleicht ein bisschen Frustration ersparen.

Man muss ja gerade bei dieser Problematik besonders darauf hinweisen, dass die Physik ja immer nur mit Modellen arbeitet und jedes Modell natürlich seine Grenzen hat, wo es durch ein anderes Modell ersetzt wird. Selbst über der Quantenmechanik gibt es ja ein übergeordnetes Modell mit der Quantenfeldtheorie. Wenn dies den Schülern bewusst gemacht werden kann, dann ist bereits ein großer Schritt getan, denn dies ist eine ganz wesentliche Eigenschaft der Physik, die im Unterricht auf keinen Fall zu kurz kommen sollte. Um eine mögliche Verunsicherung der Schüler zu vermeiden, sollte man zumindest diesen Aspekt erwähnen und nicht ganz unter den Tisch fallen lassen.

Die Quantenzahlen

Wer sich mit der Quantenphysik irgendwann einmal auseinandersetzt, wird zwangsläufig mit den Quantenzahlen konfrontiert werden. Deswegen wäre es von Vorteil, sich schon im Schulunterricht damit auseinandergesetzt zu haben.

Die Bedeutung der Quantenzahlen wird im Buch „Kulturgeschichte der Physik“ wie folgt beschrieben:

Der Zustand des Elektrons im Atom wird also durch vier Zahlen charakterisiert: die Hauptquantenzahl n (eine beliebige positive ganze Zahl; $n=1, 2, 3, \dots$), die Nebenquantenzahl l (eine beliebige positive ganze Zahl kleiner als die Hauptquantenzahl; $l= 0, 1, 2, \dots, n-1$), die magnetische Quantenzahl m (eine beliebige ganze Zahl zwischen $-l$ und $+l$) und schließlich die Spinquantenzahl s (mit den Werten $+1/2$ und $-1/2$).

(Simonyi 2001, S.438)

In der Befragung der LehrerInnen wurden die Quantenzahlen überwiegend als wichtig eingestuft, wobei trotzdem zwei interessante Tendenzen festzustellen waren.

Die erste Tendenz geht in die Richtung, dass im Unterricht nur auf die Hauptquantenzahlen eingegangen werden kann, dies gaben 3 der 14 Befragten an.

Die zweite Tendenz mit 4 von 14 war noch deutlicher, nämlich jene, dass die Quantenzahlen in der Chemie genauer unterrichtet werden und somit nicht mehr so wichtig sind, um ausführlich bearbeitet zu werden. Stellvertretend für die anderen Aussagen sei eine zitiert:

Quantenzahlen kennen sie zum Teil auch aus dem Chemieunterricht, zumindest wissen sie, was das ist.

Allerdings wird den Quantenzahlen von keinem der Befragten eine schlechtere Note als eine 2 gegeben. Dies dürfte meiner Meinung nach darauf hindeuten, dass die Quantenzahlen schon im Unterricht verwendet werden, aber deren Einführung und Erklärung wahrscheinlich auf Grund von Zeitmangel dem Chemieunterricht oft überlassen wird. Dies muss ja nicht unbedingt eine schlechte Idee sein, wenn vielleicht eine Absprache zwischen den beiden FachlehrerInnen stattgefunden hat. Wenn somit klargestellt wurde, wie die Begriffe vom anderen eingeführt wurden, ist es sogar wünschenswert im Sinne eines fachübergreifenden Unterrichts, diese Erklärungen zu übernehmen, um mehr Vernetzungen zwischen den einzelnen Fächern zu erzielen.

Das Doppelspaltexperiment

Das Doppelspaltexperiment ist sicher eines der wichtigsten, um das Wesen der Quantenmechanik zu beschreiben und verstehen zu können. Dies wird auch von verschiedenen didaktischen Modellen unterstrichen.

So ist zum Beispiel in der Berliner Konzeption (siehe Kapitel 1) ein Film über den Doppelspaltversuch mit Elektronen ein ganz wesentlicher Bestandteil der inhaltlichen Grobstruktur.

Ebenso wird von Küblbeck und Müller in ihrem Buch „Die Wesenszüge der Quantenphysik“ das Doppelspaltexperiment dazu verwendet, diese herauszuarbeiten:

Besonders deutlich zeigen sich die Wesenszüge für einzelne Quantenobjekte im seit Feynman didaktisch bewährten Doppelspalt-Experiment.

(Küblbeck/ Müller 2003, S.25)

Es werden danach viele der Wesenszüge anhand des Doppelspaltversuchs erklärt, aber darauf wird später bei den interaktiven Versuchen in Kapitel 3 noch genauer eingegangen.

Auch in vielen anderen didaktisch gut aufbereiteten Schilderungen der Quantenphysik wird viel anhand des Doppelspaltversuchs erklärt (z.B. Feynmans „QED“, bei Hey und Walters „Das Quantenuniversum“ und bei Pietschmanns „Quantenmechanik verstehen“)

Das Ergebnis bei der Befragung der Lehrer unterstreicht die didaktische Wichtigkeit dieses Versuchs, denn alle bis auf eine/n haben bei diesem Punkt die Note 1 oder 1-2 vergeben. Zur Untermauerung dieser „Noten“ noch zwei kurze Zitate aus den Interviews:

...1. Das bringe ich meistens als Einstieg;

...Der Versuch ist eigentlich sehr wichtig für die Denkweise

Daraus ist zu folgern, da sowohl in der Theorie als auch in der Praxis der Doppelspaltversuch eine große Rolle spielt, dass dieser bei den SchülerInnen auch gut

ankommen und verstanden werden kann, denn sonst würden nicht fast alle LehrerInnen auf diesen Versuch so großen Wert legen.

Die Energieniveaus

Bei dem Begriff der Energieniveaus war das Ergebnis der Befragung noch eindeutiger als bei der Frage zum Doppelspaltversuch. Alle LehrerInnen vergaben eine Note zwischen 1 und 2, wobei sogar der Großteil die Note 1 vergeben hat. Der Begriff ist anscheinend schon auch in den Jahren zuvor manchen Schülern untergekommen laut einem Interview:

Die Energieniveaus, das ist ihnen eigentlich ein Begriff, da gibt's auch bei den Energieniveaus auch keinerlei Verständnisschwierigkeiten.

Das kann durchaus sein, wenn man bedenkt, dass in der sechsten Klasse ja schon ein Laser besprochen wird. Trotzdem bietet es sich im Unterricht zur Quantenphysik an, nochmals auf die Energieniveaus einzugehen, was ja anhand der Befragung auch gemacht wird, da der Begriff und seine Bedeutung nun mit Hilfe der neuen Erkenntnisse wohl besser erklärt werden können.

Mit dem Begriff der Energieniveaus hat man ein sehr starkes Werkzeug in der Hand, mit dem man nicht nur die Funktionsweise des Lasers erklärt, sondern auch viele andere Phänomene wie die Absorptions- und Emissionsprozesse verständlich machen kann.

Einen sehr schönen und anschaulichen Zugang zu dem Begriff der quantisierten Energieniveaus findet man bei Hey und Walters:

...Wie aber folgen aus der Quantenmechanik Energiequantisierung und Stabilität der Elektronenbahnen?

Die Antwort auf diese Fragen liegt in den Welleneigenschaften der Elektronen. Laut Quantenmechanik erhält man die erlaubten Energiewerte für ein Elektron, indem man die Schrödingersche Wellengleichung mit dem jeweiligen Ausdruck für die potentielle Energie löst. Glücklicherweise können wir uns die damit verbundenen mathematischen Klimageschichten ersparen und auch so verstehen, wie Energiequantisierung zustande kommt, ohne die Schrödingergleichung

lösen zu müssen. Stellen sie sich ein Potential vor, also eine Art „Kasten“, in dem sich das Elektron befindet. Das Problem, die erlaubten Energieniveaus für dieses Quantensystem herauszufinden, ist nunmehr mathematisch identisch mit einem Problem der klassischen Physik, und zwar der Lösung der Wellengleichung für eine schwingende Saite, die an ihren beiden Enden fixiert ist. Im Fall der schwingenden Saite ist anschaulich sofort klar, dass nur bestimmte „Wellenlängen“ zwischen die festen Endpunkte passen. Diese Wellenlängen entsprechen den verschiedenen Tönen, die wir im Klang der Saite hören... In der Quantenmechanik sind es ganz analog dazu die Wahrscheinlichkeitswellen des Elektrons, die in den Kasten passen müssen. Wobei jede in diesem Sinne erlaubte Wellenlänge jetzt mit einer bestimmten Elektronenenergie verknüpft ist – eben Bohrs quantisierten Energien. Nach klassischen Gesetzen kann sich eine Kugel in einem Kasten mit beliebiger Energie bewegen; quantenmechanisch sind für ein Elektron in einem Kasten hingegen nur gewisse Energiewerte erlaubt.

(Hey/Walters 1998, S.71)

Mit dieser sehr schönen Analogie wird hier eine sehr schöne Verknüpfung mit der Wellenlehre und der Akustik hergestellt. In weiterer Folge werden auch noch Klangfiguren auf einer Paukenoberfläche verwendet, um den 2- dimensionalen Fall zu veranschaulichen. Meiner Meinung nach ist dies ein sehr lohnender Zugang, da die Begriffe aus der Wellenlehre und Akustik mit einem anderen Teilgebiet der Physik in Verbindung gebracht werden. Dies ist damit im Sinne eines vernetzenden Unterrichts, der seitens der Fachdidaktik als unerlässlich für einen guten Physikunterricht angesehen wird.

Das Pauli - Prinzip

Das von Wolfgang Pauli erstellte Prinzip ist sicherlich ein weiterer Grundbaustein der Quantenphysik, das keinesfalls im Unterricht zur Quantenphysik fehlen sollte. Man kann es folgendermaßen definieren:

Dieses Prinzip besagt: Innerhalb eines Systems können sich zwei beliebige Elektronen nicht in demselben Quantenzustand befinden, d.h., die die Quantenzustände charakterisierenden vier Quantenzahlen n , l , m , s , können nicht bei beiden Elektronen identisch sein.

(Simonyi 2001, S.438)

Mit diesem Prinzip wurde es dank der Quantentheorie möglich eine Erklärung für das empirisch gefundene periodische System der Elemente zu erstellen, wie man auch aus der Aussage von Hey und Walters in deren Buch schließen kann:

Nichtsdestoweniger blieb der regelmäßige Aufbau des Periodensystems mehr als fünfzig Jahre rätselhaft, bis schließlich der österreichische Physiker Wolfgang Pauli sein berühmtes „Ausschlussprinzip“ formulierte.

(Hey/Walters 1998, S.111)

Das Pauli Prinzip wurde auch von den LehrerInnen als überwiegend wichtig eingestuft. Von den 14 Befragten gaben zehn die Noten 1 oder 2 und nur zwei die Note 3-4. Allerdings ist auch bei diesem Begriff eines klar ersichtlich, nämlich dass der Begriff schon aus der Chemie als bekannt vorausgesetzt werden kann.

Vier der Befragten gaben an, dass der Begriff schon in der Chemie durchgenommen wurde und somit bekannt ist. Die Aussagen sind ähnlich dem folgenden Zitat:

Das Pauli Prinzip, das bringen sie auch aus dem Chemieunterricht mit.

Es ist also beim Pauli Prinzip ein ähnlicher Trend zu erkennen wie bei den Quantenzahlen. Der Begriff wird also direkt aus dem Chemieunterricht übernommen. Wie schon oben erwähnt, kann man daraus durchaus positive Aspekte eines fachübergreifenden Unterrichts sehen. Es wäre wünschenswert, dass sich mit dem neuen Oberstufenlehrplan für die Physik, der ja eine Erklärung des Atommodells aus moderner Sicht am Anfang der siebenten Klasse vorsieht, eine breitere Zusammenarbeit zwischen den Fächern Physik und Chemie im Schulunterricht ergibt.

Der Photoeffekt

Der Photoeffekt ist bei der Lehrerbefragung jener Begriff gewesen, der mit Abstand die beste Bewertung bekommen hat. Alle der befragten LehrerInnen gaben dem Photoeffekt die Note 1. Aber nicht nur die Benotung, sondern auch die Kommentare zu der Note

unterstreichen noch, dass dieser Begriff bei keinem der Befragten im Unterricht zur Quantenphysik fehlen darf. Wie z.B. folgende Aussagen:

Der Photoeffekt ist sehr wichtig, den besprechen wir eigentlich genau.

Mit dem fange ich überhaupt an!

Man kann an den Aussagen erkennen, dass der Photoeffekt als sehr wichtig angesehen wird und es ist anzunehmen, dass der Photoeffekt aus zwei Gründen so beliebt ist. Einerseits ist der Photoeffekt eines der wenigen Experimente aus dem Teilgebiet der Quantenphysik, das man den Schülern in der Schule direkt zeigen kann. Somit glaube ich ist er auch bei den Unterrichtenden sehr beliebt. Andererseits ist der Photoeffekt natürlich geradezu prädestiniert als Überleitung und Motivation zur Lichtquantenhypothese von Einstein.

Eine schöne Schilderung des Photoeffekts und die daraus folgende Erklärung durch Einstein findet man in dem Buch „Quantenmechanik verstehen“ von Pietschmann:

Schon 1887 hatte Heinrich Hertz beobachtet, dass einfallendes Licht aus einer Metalloberfläche Elektronen löst (photoelektrischer Effekt oder Photoeffekt); wird eine Spannung angelegt, so können diese Elektronen an der Anode aufgefangen werden und es fließt ein Strom. Die maximal kinetische Energie dieser Elektronen kann gemessen werden, wenn die Spannung umgekehrt und verstärkt wird, bis der Strom verschwindet.

Nach der klassischen Wellentheorie des Lichtes sollte die kinetische Energie (zuzüglich Ablöseenergie W) der Intensität des Lichtes proportional sein, also dem Quadrat der Amplitude. Das erstaunliche Ergebnis war aber, dass keine Abhängigkeit von der Intensität, wohl aber von der Frequenz feststellbar war. Quantitativ gilt: $E_{kin} + W = \hbar\omega$

Einstein benutzte die Planksche Beziehung, um den Photoeffekt zu erklären. Dazu musste er allerdings die Quantennatur dem Licht selbst zuschreiben.... Das Licht selbst (und damit jede elektromagnetische Welle) sollte gemäß $E=\hbar\omega$ „quantisiert“ sein, zu einer gegebenen Frequenz f sollte das Licht nur in Vielfachen von $h\cdot f$, den Lichtquanten oder „Photonen“ auftreten.

(Pietschmann 2003, S.17)

Nach dieser schönen Schilderung kommt bei Pietschmann zur Sprache, dass der Photoeffekt eine Verknüpfung von Begriffen der Kontinuumsphysik mit denen der

Teilchenphysik herstellt. Dazu wird dann auch in diesem Buch noch der Physikdidaktiker Roman Sexl zitiert:

Die Theorie der Lichtquanten war ein kühner Schritt. Er bedeutete eine völlige Abwendung von der Wellentheorie des Lichtes, zu der die Physik in jahrhunderte langer Arbeit gelangt war...

Die klassische Physik ging von der Vorstellung aus, dass Körper aus einzelnen Atomen (diskret) aufgebaut sind, während Licht eine kontinuierliche Welle bildet. Einstein stellte sich die Frage, ob nicht auch Licht aus diskreten Teilchen, den Lichtquanten, bestehen könnte. Dadurch versuchte er eine Asymmetrie aus unserer Naturbeschreibung zu eliminieren.

(Sexl 1979, S53.)

Wie kühn Einsteins Hypothese war, sieht man auch an einer Aussage Max Plancks, der diese nicht akzeptieren konnte. Die Aussage ist wieder ein Beispiel dafür, dass in der Wissenschaft nicht immer neue Theorien von allen Beteiligten akzeptiert werden. Ein Aspekt der Naturwissenschaft, der auch im Unterricht den Schülern des Öfteren vor Augen gehalten werden sollte. Dies sieht man auch an Plancks Aussage im Jahre 1913, die er bei dem Antrag, Albert Einstein in die Preußische Akademie der Wissenschaften aufzunehmen, tätigte:

Dass Einstein in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie zum Beispiel in seiner Lichtquantenhypothese, wird man ihm nicht allzu sehr anrechnen dürfen. Denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Wissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.

(Pietschmann 2003, S.18)

So gut auch der Photoeffekt bei den Lehrenden in der Schule und auf der Universität anzukommen scheint, gibt es seitens der Fachdidaktik nicht nur Befürworter der Verwendung des Photoeffekt als Einführung in die Quantenphysik und Herleitung der Lichtquantenhypothese. Wie zum Beispiel in einem Bericht von Fischler dargestellt wird:

... Sowohl die Interpretation des Photoeffekts als auch seine Platzierung werfen didaktische Fragen auf, die schon längst gestellt wurden, bisher aber nur geringe Resonanz hervorriefen.

In vielen Untersuchungen (z.B.: Lichtfeld 1992) wird festgestellt, dass die Schüler den Photonen Teilchencharakter zuschreiben, die vorsichtigeren Begriffe Energie-Portion oder Lichtquant werden zugunsten anschaulicherer Beschreibungen schnell aufgegeben. Es hat sich in der Regel

ein Bild festgesetzt, in dem die Photonen in ganz klassischem Sinne auf Elektronen prallen und diese aus dem Festkörper herauslösen. Es ist zu vermuten, dass man diese Verbindung, die die Schüler zwischen dem beobachteten Phänomen, der gegebenen Deutung und klassischen mechanistischen Vorstellungen herstellen, kaum aufbrechen kann, solange man am Photon an dieser Stelle des Unterrichts festhält....

(Fischler, Helmut: Anschaulichkeit oder Abstraktion- Grundlagen oder Anwendungen? In: Fischler 1992, S.16.)

Es wird als besser dargestellt, den Einstieg in die Quantenphysik mit Hilfe von Doppelspaltversuchen mit Elektronen zu gestalten, an denen das nicht-klassische Verhalten von Mikroobjekten demonstriert werden kann und keine Gefahr besteht, dass seitens der Schüler neue Verbindungen zu mechanistischen Vorstellungen hergestellt werden. Abschließend steht noch folgende Aussage:

Angesichts der durch Befunde erhärteten lernpsychologisch begründeten Kritik und der fachbezogenen Infragestellung ist es beunruhigend, dass sich in Lehrplänen und Schulbüchern die Stellung des Photoeffekts bisher überhaupt nicht geändert hat. Didaktische Entscheidungen auf allen Ebenen sind offensichtlich viel stärker von Traditionen abhängig und gegenüber vielfach gestützten Argumenten resistent, als es für rationale Diskussionen in der Fachdidaktik förderlich ist.

(Fischler a.a.O.,S.17)

Die Aussagen sind ziemlich hart formuliert und kritisieren die Schulbuchautoren und Lehrplanersteller. Allerdings kann ich die Kritik an der Platzierung des Photoeffekts nicht ganz nachvollziehen, da auch in den meisten Universitätslehrbüchern der Photoeffekt an der gleichen Stelle eingesetzt wird. Es ist daher absolut nachvollziehbar, dass der Großteil der Unterrichtenden diesem Schema folgt, weil auch dieses meiner Meinung nach gut aufbereitet werden kann. Die Einwände sind sicherlich berechtigt, doch zeigt die Befragung, dass in der Praxis der Photoeffekt nicht aus dem Konzept der Unterrichtenden an der Schule als auch der Universität wegzudenken ist. Trotzdem ist es meiner Meinung nach wichtig, sich auch immer die Argumente der Kritiker vor Augen zu halten, um etwaige Verbesserungen bei berechtigten Kritikpunkten in seinen Unterricht einzubauen.

Die Materiewellen

Bei dem Begriff der Materiewellen war die Wertung etwas zurückhaltender als bei der des Photoeffekts, aber immer noch überwiegend positiv. Die Notenwerte waren zwar zwischen 1 und 2 ziemlich gleich verteilt. Es gab aber auch eine kritische Aussage, ob der Begriff der Materiewellen für das Verständnis des Schülers überhaupt etwas beiträgt:

Materiewellen, das ist ein sehr schwer zu verstehender Begriff, also mathematisch behandle ich das überhaupt nicht. Über Materiewellen gibt es viele Diskussionen, also da kann man den Schülern allein von ihren Vorstellungen und wie sie sich das vorstellen, da geht relativ viel Zeit damit drauf.

Man kann aus dieser Aussage erkennen, dass die befragte Person ein gewisses Unbehagen empfindet, den Begriff der Materiewellen ihren Schülern beizubringen, weil sie vermutet, dass die Schüler mit der Vorstellung Probleme haben könnten.

Wie sieht die Fachdidaktik die Einführung von Materiewellen im Schulunterricht? In einem Artikel von Fischler wird folgendes dazu geschrieben:

... Die nach der Methode von Davisson und Germer erhaltenen Ringe sind die Bestätigung dafür, dass Elektronen Welleneigenschaften haben, also ist λ offensichtlich die Wellenlänge von „Materiewellen“, deren Interferenzen zum Ringsystem führen. Hin und wieder werden Einschränkungen gemacht, etwa derart, dass man sich darunter keine klassischen Wellen vorstellen dürfe und dass die De-Broglie - Welle nur ein Rechenhilfsmittel sei.

Wie soll der Schüler diese Redeweise aufnehmen, in der einer der wichtigsten Begriffe der klassischen Physik ständig verwendet wird und gelegentlich der Hinweis zu hören ist, „Welle“ bedeute nun etwas anderes, was eigentlich, kann aber nicht angegeben werden.

Und weiters über die Schülervorstellungen zur Materiewelle:

...sie haben mit der ersten Bemerkung über „Materiewellen“ ein Bild entworfen, das nahtlos an bekannte Vorstellungen anknüpft: Das Elektron auf einer Führungswelle konserviert die Teilchenvorstellung und ermöglicht gleichzeitig die Deutung des Interferenzbildes. Aber auch diese Interpretation ist nicht haltbar, und wegen der Attraktivität des Modells müsste auf den Nachweis

seiner Schwäche besonderer Nachdruck gelegt werden. Das ist nicht schwer, z.B. müsste beim Doppelspalt eine Trennung des Elektrons von einem Teil der Führungswelle erfolgen.

(Fischler a.a.O.,S.14 ff.)

Insgesamt kann man ganz deutlich erkennen, dass die Verwendung des Begriffs Materiewelle sehr in der Kritik seitens der Fachdidaktik steht. Dieser Begriff birgt einfach sehr viele Gefahren, falsche Vorstellungen zu erzeugen, die noch dazu scheinbar übereinstimmen mit bereits gelernten Begriffen aus der klassischen Physik. Damit stellt sich die Frage, ob man im Unterricht überhaupt die Materiewelle einführen soll, da der Erkenntnisgewinn nicht so groß erscheint, im Gegensatz zu den vielen Missinterpretationsmöglichkeiten die dadurch geboten werden. Meiner Meinung nach kann man durchaus auf das Wort Materiewelle im Unterricht verzichten, sollte aber die Aussage der de Broglie – Beziehung und deren Bedeutung nicht unter den Tisch fallen lassen.

Trotz der Kritik an dem Begriff möchte ich noch eine kurze Beschreibung von Hey und Walters anführen, die auch die Bedeutung schön beschreibt, da dieser Begriff immer noch im Unterricht verwendet wird und die Schlussfolgerungen sicherlich nicht aus dem Unterricht verschwinden sollten, da man an ihnen erkennen kann, warum Quanteneffekte in der mit unseren Sinnesorganen wahrgenommen Welt nicht zu beobachten sind:

..Wenn alle „Teilchen“ Welleneigenschaften zeigen, warum dauerte es so lange, bis die Physiker diese Materiewellen beobachteten? Warum beobachten wir keine Gewehrkegel, Billardbälle oder Autos, die sich wie Wellen verhalten? Wiederum liegt die Antwort auf diese Fragen in dem winzigen Wert der Planckschen Konstante. De Broglie zufolge ist jedem Teilchen, das sich mit einem Impuls p fortbewegt, eine Materiewelle der Wellenlänge λ zugeordnet und zwar gemäß der Formel $\lambda=h/p$ (de Broglie- Beziehung); Wellenlänge= Plancksche Konstante dividiert durch Impuls. Für die makroskopischen Objekte unserer Alltagswelt ergibt sich daraus aufgrund ihres relativ großen Impulses und des sehr kleinen Werts von h eine ungeheuer kleine Wellenlänge. Warum sollte man aber eine derart kurze Wellenlänge nicht beobachten können? Als wir die für Wellen typischen Interferenzeffekte am Doppelspaltexperiment erklärten, haben wir eine Grundvoraussetzung außer acht gelassen: Der Abstand der beiden Spalte muss nämlich in etwa dieselbe Größenordnung haben wie die Wellenlänge der interferierenden Objekte, beispielsweise der Elektronen oder Photonen, damit das Interferenz überhaupt sichtbar ist. Da aber die de-Broglie- Wellenlänge einer Gewehrkegel sogar noch weit unterhalb atomarer Größenordnungen

liegt, ist es völlig unmöglich, sich ein Experiment auszudenken, in dem die Interferenz von Gewehrkegeln oder irgendwelcher anderer makroskopischer Objekte zum Vorschein käme....
(Hey/Walters 1998, S.52f.)

Das EPR-Paradoxon

Der letzte zu benotende Begriff war der des EPR (Einstein, Podolsky, Rosen)- Paradoxon. Das EPR- Paradoxon und dessen Bedeutung ist ein wichtiger Bestandteil der heutigen Experimente zur Quantenphysik, wie z.B. den Experimenten zur Quantenteleportation der Gruppe um Zeilinger. Damit ist das EPR Paradoxon ein wichtiger Schlüssel um die aktuellen Experimente und deren Ziele zu verstehen. Meiner Meinung nach sollte es auch in der Schule behandelt werden, zumindest die Aussage des Experiments, um den Schülern zu ermöglichen einen Einblick in die moderne Forschung zu bekommen und deren Interesse dafür zu wecken. Das EPR Paradoxon wurde schon 1935 veröffentlicht, doch es ist damit kein „altes Eisen“, da die Anzahl der Zitierungen im Jahresschnitt immer weiter ansteigt.

Das EPR – Paradoxon hat bei der Befragung nicht sehr gut abgeschnitten. Fünf der Befragten gaben an, dass sie es gar nicht im Unterricht durchnehmen. Drei weitere gaben nur Noten zwischen 3-4 und 4. Dann gab es noch die Note 2 von 4 Befragten. Die Note 1 wurde gar nicht vergeben. Damit hat dieser Begriff die schlechteste Bewertung aller 10 abgefragten Begriffe erhalten.

Bei manchen der Befragten war zu erkennen, dass von ihnen der Begriff schon in Bezug auf die modernen Experimente unterrichtet wird:

Na ja, die Verschränkung der Teilchen insofern, als ich vom Zeilinger das Experiment mache, manchmal mit interessierten Klassen, und da ist das EPR Paradoxon ein aktuelles Experiment. Das braucht man dann auch beim Beamen.

Es ist sicherlich ein Problem, das EPR –Paradoxon schulgerecht aufzubauen, da der quantenmechanische Formalismus, den man dabei in vielen Lehrbüchern und

Unterrichtsvorschlägen verwendet, sicherlich viele Schüler abschrecken würde. Eine schöne Schilderung findet man bei Pietschmann:

Nehmen wir an, ein (instabiles) Teilchen ohne Spin zerfällt in zwei gleiche Tochterteilchen mit Spin; ein einfaches Beispiel dafür (das wegen der extrem kurzen Lebensdauer des neutralen π -Mesons zwar für wirkliche Experimente ungeeignet ist, aber das Wesentliche schön beschreibt) ist der Zerfall eines neutralen π -Mesons in zwei Photonen $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.

Im Ruhesystem des π -Mesons müssen die beiden Photonen aus Impulserhaltungsgründen in entgegengesetzter Richtung kollinear ausgesandt werden; da das π -Meson keinen Spin trägt, müssen die Spins der Photonen (verantwortlich für deren Polarisation) aus Gründen der Drehimpulserhaltung entgegengesetzt gerichtet sein. Nach den Regeln der Quantenmechanik ist die konkrete Richtung des Spins(also der Polarisation) der Photonen nicht festgelegt, solange sie nicht gemessen werden; sie müssen lediglich entgegengesetzt gerichtet sein, um den Drehimpuls zu erhalten. Im Gedankenexperiment stellen wir uns das System in einem leeren Raum (also ohne Störung) vor und können mit einem Polarisationsanalysator beliebig weit vom zerfallenden Pion weg die Polarisation eines der beiden Photonen bestimmen. Durch diese Messung wird aber nicht nur der Spin dieses Photons festgelegt, sondern- wegen der Drehimpulserhaltung- auch der des anderen, das sich nun doppelt so weit weg befindet! Dies scheint im Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie zu stehen, die ja bekanntlich ausschließt, dass sich Wirkungen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können. Es ist daher verständlich, dass Einstein diesen Einwand als genügend gravierend empfand, um die Quantenmechanik in dieser Form abzulehnen.

Die Lösung dieses Paradoxons haben wir aber schon kennen gelernt! Aufmerksame Leserinnen und Leser sollten bemerkt haben, dass wir – fälschlicherweise – nun wieder vom einen und anderen Photon gesprochen haben, was wegen der Verschränkung der beiden Teilchen sinnlos ist! Es ist eben nicht so, dass wir an einem der beiden Photonen den Spin messen und dadurch auch am anderen einen Spinzustand erzeugen, sondern es gibt nur ein Doppelphoton, an dem durch eine Messung die Spinrichtung beider Photonen hergestellt wird! Die Verschränkung wird durch eine Messung (Im Sinne eines „Quantensprunges“ oder einer „Reduktion der Wellenfunktion“) aufgehoben.

Das Paradoxon stellt daher keinen Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie dar.....

(Pietschmann 2003, S.105f.)

Es wird sicherlich einige Zeit im Unterricht nötig sein, um dieses Thema ausreichend darzustellen. Denn es ist nicht nur wichtig, eine Schilderung des Paradoxons im Unterricht zu bringen, sondern vor allem für die Diskussion über das Paradoxe an der ganzen Sache muss wohl einige Zeit eingeplant werden. Gerade in der Diskussion kann, so glaube ich,

einiges an Erkenntnisfortschritt über das Wesen der Quantenphysik gewonnen werden. In einem Artikel von Jaeckel und Pade (1992) werden einige Punkte genannt, die den Einsatz des EPR – Paradoxon didaktisch begründen. Die einzelnen Argumente werden gekürzt dargestellt:

1. Wenn die spezifische Erkenntnisweise der Quantenmechanik (und ihre Schwierigkeiten) in der Schule dargestellt werden soll, bietet es sich an, dieses am Beispiel des EPR- Paradoxon zu vermitteln, weil historisch an diesem Gedankenexperiment Einstein und Bohr die unterschiedlichen Interpretationsweisen der Quantenmechanik kontrovers diskutiert haben und heute die Möglichkeit besteht, experimentell den alten Streit zu entscheiden.
2. Viele Fachphysiker verwenden das EPR-Paradoxon in elementarisierter Form, um die spezifische Erkenntnisweise auch dem Laien verständlich darzustellen.
3. Anhand der Fragestellung kann auch insbesondere für Schülerinnen und Schüler in Leistungskursen eine Einführung in Interpretationsfragen der Quantenmechanik vorgenommen werden, die ungelöste Forschungsfragen der heutigen Physik aufzeigen. Darüber hinaus ist die Thematik von grundlegender Bedeutung für die Wissenschafts- und Theoriebildung und das auch über die Physik hinaus.
4. Die mit dem EPR- Paradoxon verbundenen Probleme werden in der Fachliteratur z.T. kontrovers diskutiert. Dies gibt Gelegenheit, dem vor allem in der Schule verbreiteten Eindruck zu begegnen, es gäbe nur „fertige“ und abgeschlossene naturwissenschaftliche Begriffsbildungen und Theorien.
5. In der fast 60- jährigen Geschichte des EPR- Paradoxon gibt es eine Reihe interessanter wissenschaftshistorischer und –soziologischer Aspekte, die unter anderem dazu geeignet sind, allzu romantische Vorstellungen über Forscher und Forschung im Keim zu ersticken. So scheinen z.B. experimentelle Daten zurückgehalten worden zu sein, weil sie nicht in die damalige wissenschaftliche Landschaft passten.

Diese ganzen Punkte sprechen auch meiner Meinung nach sehr für den Einsatz des EPR-Paradoxon. Vor allem der Punkt 1 ist meiner Meinung nach sehr wichtig für den Unterricht, da mit ihm viel über das Wesen der Quantenmechanik ausgesagt werden kann. Wie weit man im Unterricht die anderen verschiedenen genannten Punkte einbauen kann, liegt sicherlich am zeitlichen Rahmen, den man im Unterricht zur Verfügung hat. Wie z.B: in Punkt 3 angeführt ist dieser vor allem für Leistungskurse gedacht. Meiner Meinung nach ist es im Regelunterricht fast unmöglich alle Punkte zu erfassen, was auch nicht unbedingt nötig ist, es ist nur schön zu sehen aus wie vielen Blickwinkeln man dieses Paradoxon betrachten und im Unterricht einbringen kann. Wenn Interesse seitens der Schüler besteht, kann man ja in einer Wahlpflichtfachgruppe versuchen mehrere Punkte, die die Schüler interessieren zu behandeln.

Begriffe, die ein Schüler als Minimalziel erklären können sollte

Bei dieser Frage war zu erwarten, dass die Antworten ziemlich weit gestreut sein werden. Trotzdem wird nun versucht, einige Aussagen zu zitieren, die allgemeine Trends zu erkennen geben.

Einer der meist genannten Begriffe war jener der Unschärferelation von Heisenberg. Ebenfalls wurden die Begriffe des Photoeffekts und des Doppelspaltexperiments genannt. Knapp dahinter war noch der Begriff der Materiewelle. Stellvertretend für eine Menge der Aussagen wird diese hier zitiert:

Also wenn sie den Begriff de Broglie kennen und Photoeffekt, erklärt durch Einstein 1905, wäre eigentlich ... und Unschärferelation und Doppelspaltexperiment, das was man in der achten Klasse so bringen kann.

Etwas verwunderlich war, dass das Bohr'sche Atommodell nur einmal genannt wurde, da der Begriff bei der Bewertung der Begriffe eine der vordersten Positionen eingenommen hat. Vielleicht ist der Begriff des Bohr'schen Atommodells zwar für ihren Unterricht wichtig, aber er gehört nicht zu den Begriffen, die die Schüler nach dem Unterricht der Quantenphysik reproduzieren können sollen.

Ein weiterer Aspekt, der in den Antworten zur Sprache gekommen ist, ist die Schwierigkeit die Begriffe der Quantenphysik überhaupt in eigenen Worten zu beschreiben, ohne dabei zu unexakt zu werden oder die Aussagen zu verfälschen:

Die eigenen Worte machen mir da einmal ein Problem, weil gerade in der Quantenphysik, die Quantenphysik eine Sprache hat, die so leicht unexakt werden kann. Wenn man da eigene Worte wählt nur einzelne austauscht, das ist für Schüler sehr schwierig. Das werden nur sehr gute Leute schaffen...

Dies ist sicherlich eine berechtigte Sorge, doch meiner Meinung nach ist es für Lehrer und Schüler schwer, wenn sie versuchen, die Begriffe in eigenen Worten zu erklären. Trotzdem sollte man es probieren, denn sonst besteht die Gefahr, dass man nur schablonenhafte Sätze im Unterricht verwendet und damit sehr formal wird, was nicht unbedingt Interesse und Motivation der Schüler fördern wird.

Obwohl es nicht erwartet wurde, da ja nach Begriffen gefragt war, gaben mehrere der Befragten an, dass sie bei dem Thema der Quantenphysik die Problematik der Theoriebildung besonders betonen. Vielen ist anscheinend bei der Quantenphysik wichtig die Funktion der Theorien in der Physik genauer zu betrachten:

Ich baue das immer relativ geschichtlich auf. Dass er formulieren kann, wozu eine Theorie tauglich ist, also das heißt, die Theorie einmal formulieren kann und wozu kann ich sie nutzen und was kann sie schon abdecken. Also immer genau, wie weit geht das und wo kommt dann die nächste und wie schaut es dann im Endeffekt aus.

Meiner Meinung nach ist die Frage der Theoriebildung und der Bedeutung von Theorien eine sehr wichtige und sollte unbedingt im Unterricht behandelt werden. Vielleicht nützen die Befragten gerade das Erstaunliche an der Quantenphysik, um das Wesen von Theorien besser herauszuarbeiten. Allerdings sollte man die Bedeutung von Theorie und Experiment, die ja ein ganz wesentlicher Bestandteil des Wesens der Physik darstellt, nicht nur bei der Behandlung der Quantenphysik und damit eher gegen Ende als besonders wichtig darstellen, sondern vielleicht schon früher -in der Schullaufbahn- dieses Thema ebenfalls behandeln. Denn wenn die grundlegenden Begriffe zur Theoriebildung schon bekannt sind, kann man gerade das Außergewöhnliche an der Quantenmechanik leichter feststellen und mit den Schülern erarbeiten.

Die Sonderstellung der Quantenmechanik wird auch bei Pietschmann in seinem Buch „Phänomenologie der Naturwissenschaft“ deutlich gemacht. In dem Kapitel über die Rolle von Widersprüchen in der Naturwissenschaft werden fünf Stufen der Elimination vorgestellt. Jede der Stufen stellt eine Form der Widerspruchselimination dar. Daher ist die Stufe, auf der es gelingt, den Widerspruch zu eliminieren, ein Merkmal des betrachteten Widerspruchs. Die Stufen in ihrer Reihenfolge bilden dann den Weg, den jeder Widerspruch bis zu seiner Elimination durchlaufen muss. Die Stufe eins ist die Phase der Kritik, gefolgt von Stufe zwei der phänomenologischen Analyse und Stufe drei durch Zuordnung durch Einschränkung des Gültigkeitsbereiches oder Zusatzhypothese. Bei der Stufe vier kann man den Widerspruch mit Einordnung durch Modifikation der Theorie erreichen. Die Stufe fünf ist die Synthese durch Aufheben des Widerspruches. Das Bemerkenswerte an diesen Stufen ist, dass es nur die Quantenmechanik bis zur Stufe fünf der Elimination geschafft hat, während es für die anderen Stufen mehrere Beispiele aus dem Bereich der Physik gibt. Was ist nun das Besondere an der Quantenmechanik, dass sie als einzige die Stufe fünf, die der Synthese, erreicht? Hierzu die Erklärung von Pietschmann:

Wenn die Quantenmechanik- als bisher einzige Theorie der Naturwissenschaft- tatsächlich eine echte Synthese darstellt, dann ist zu zeigen, in welchem Sinne der Widerspruch in des Wortes dreifacher Bedeutung aufgehoben ist. Zunächst ist festzustellen, dass die Quantenmechanik- wie jede andere physikalische Theorie- mathematisch formuliert ist; da die Mathematik aber der Inbegriff der Widerspruchsfreiheit (so wie aller drei Axiome der Logik) ist, gilt damit jeder Widerspruch als eliminiert!

Zum Unterschied von anderen Theorien der Physik ist aber die Quantenmechanik in ihrer mathematischen Niederschrift noch nicht vollständig! Sie bedarf noch ihrer Interpretation, ohne die eine experimentelle Überprüfung ihrer Voraussagen nicht möglich wäre. Und in dieser Interpretation ist der Widerspruch als Welle-Teilchen- Dualismus oder Komplementarität bewahrt! Schließlich ist die Quantenmechanik- genau aus diesem Grunde- die einzige Theorie der Physik, die die philosophische Frage nach den Voraussetzungen der naturwissenschaftlichen Methode geradezu herausfordert. So wurde etwa im Juni 1980 (in der Zeitschrift „Spektrum der Wissenschaft“) eine Auseinandersetzung von zwei eminenten Physikern (Victor Weisskopf und Bernard D’Espagnat) ausgetragen, ohne dass eine Einigung in Sicht gewesen wäre...In diesem Sinne ist der Widerspruch auch auf eine höhere Ebene gehoben!

(Pietschmann 1996, S. 205 f.)

Meiner Meinung nach wird durch die Betonung dieser Sonderstellung der Quantenmechanik im Theoriengebäude der Physik das Interesse der Schüler weiters geweckt und möglicherweise steigt mit diesem Zugang auch die Motivation sich außerschulisch mit diesem Thema auseinanderzusetzen.

Wo haben die Befragten ihr Wissen zur Quantenphysik erworben?

Diese Frage zielt ja vor allem in die Richtung, inwiefern die Befragten ihr Wissen in ihrer Ausbildung bzw. Fortbildung erworben haben oder ob sie sich selbst weitergebildet haben.

Das Ergebnis der Befragung ist nicht weiter überraschend, aber doch aufschlussreich. Es gab eigentlich nur drei Antworten. Der Wissenserwerb erfolgte bei acht der Befragten während des Studiums, ebenfalls gaben acht der Befragten an im Selbststudium sich Ihr Wissen angeeignet oder erweitert zu haben. Die Möglichkeit der Fortbildung wurde von sechs der Befragten genannt, wobei natürlich Mehrfachnennungen möglich waren.

Ein interessanter Punkt ist dennoch zu nennen. Anhand der Aussagen kann man erkennen, dass es so eine Art von Zweiteilung des Wissenserwerbs gegeben hat. Während die eher jüngeren Lehrkräfte Ihr Wissen als überwiegend von der Ausbildung auf der Universität aufgebaut sehen, ist bei den älteren Lehrkräften die Rolle der Fortbildung und des Selbststudiums als stärker anzusehen. Stellvertretend für die zwei Aussagentypen werden nur zwei kurz zitiert:

Zuerst natürlich im Studium, zu 99%. Und dann klarerweise Vorbereitung schreiben, Bücher anschauen, teils neue Uni-Lehrbücher, Lehrbücher die wir nicht verwenden.

Na ja Quantenphysik...Ich bin ein relativ alter Hase. Auf der Uni hab ich noch nicht soviel davon gehört, oder nur rechnen, aber das, was man im Unterricht braucht, eigentlich nicht. Hauptsächlich Fortbildung und Vorträge.

Daran kann man erkennen, dass die didaktische Aufbereitung der Quantenphysik auf der Universität anscheinend besser geworden ist, dies wahrscheinlich auch auf den Rückmeldungen der LehrerInnen basierend, die die Fortbildungen besucht haben.

Welche Materialien zur Unterrichtsvorbereitung verwendet werden

Auch bei der Frage nach den verwendeten Materialien zur Unterrichtsvorbereitung gab es im Großen und Ganzen keine besonders überraschenden Antworten. Als Quellen zur Unterrichtsvorbereitung wurden Bücher, Zeitschriften und das Internet genannt. Als Beispiel für ähnliche Aussagen wird hier diese zitiert:

Naja, Bücher, Zeitschriften, vor allem Spektrum der Wissenschaft. Ist eine Standardlektüre, wenn man halbwegs am neuesten Stand bleiben will. Da kopiere ich auch immer einige Sachen. Zum Teil das Internet jetzt auch schon.

Der Großteil der Befragten gab an, Bücher zur Unterrichtsvorbereitung zu verwenden. Dabei wurden natürlich Schulbücher angeführt, aber auch einige andere Lehrbücher wie jenes von Tipler oder die Feynman Lectures.

Das Internet und Artikel aus Zeitschriften wurden nur jeweils von 3 der 14 Befragten genannt. Damit ist ein ganz klarer Abfall der Nennungen gegenüber den Büchern zu erkennen, die immerhin von zehn der Befragten genannt wurden.

Insgesamt kann man sagen, dass die Tendenz immer noch deutlich in Richtung der Lehrbücher geht, wenn es um die Unterrichtsvorbereitung geht, was keineswegs kritisiert werden soll, sondern nur eine Feststellung. Es liegt auf der Hand, denn die Befragten werden sich ihr Wissen aus eben diesen Büchern konstruiert haben und greifen somit gerne wieder auf sie zurück. Im Sinne eines Unterrichts, der auch auf die moderneren Aspekte der Wissenschaft eingeht, ist es natürlich wünschenswert, wenn Informationen aus dem Internet oder aktuellen wissenschaftlichen Zeitschriften erfolgen und wie es die Befragung zeigt, wird dies von einem Anteil von ca. 50% auch so praktiziert. Außerdem heißt dies ja keineswegs, wenn die befragten Personen Zeitschriften und das Internet nicht als Material für die direkte Vorbereitung erwähnen, dass sie nicht trotzdem die aktuellen Ereignisse im Internet oder in den Zeitschriften verfolgen und es abrufbar als Hintergrundwissen parat haben und im Unterricht auch einbringen.

Welche Medien werden im Unterricht zur Quantenphysik verwendet

Die Frage nach den verwendeten Medien wurde von den Befragten recht einheitlich beantwortet. Fast alle verwenden im Unterricht zur Quantenphysik Overhead- Folien. Nur eine/r der Befragten antwortete, dass sie gar keine Folien im Unterricht einsetze und auch keine Experimente im Bereich der Quantenphysik verwende. Ansonsten war die üblichste Antwortform ziemlich übereinstimmend mit jener folgenden:

Overhead-Folien auf alle Fälle. Experimente, soweit möglich. Also zum Beispiel Photoeffekt ist eine Pflicht. Computersimulationen gibt's kaum. Wäre vielleicht aber nicht schlecht. Filme haben wir auch fast keine, die ich verwende.

Aus der oben zitierten Aussage kann man folgern, dass auch die Experimente, soweit möglich, bei den Befragten zum Standardrepertoire ihres Unterrichts gehören. Bei diesen Experimenten nimmt die Demonstration des Photoeffekts eine besondere Stellung ein. Fast alle der befragten Lehrer, die die Verwendung der Experimente angaben, erwähnten zusätzlich, dass sie im speziellen den Photoeffekt meinen und ihn viele sogar als Einstieg in die Quantenphysik verwenden. Dies ist sicherlich nicht sehr erstaunlich, da dies auch eine deutsche Befragung von LehrerInnen durch Burkhard und Schecker (2004) zeigt, bei der ca. 58% angaben, den Photoeffekt als Einstieg zu verwenden, während der Doppelspalt als Einstieg an zweiter Stelle liegend nur von 15,5% benützt wird.

Die oben zitierte Aussage ist zwar sehr charakteristisch, aber im Bezug auf den Einsatz von Filmen nicht ganz zutreffend. So gaben mehr als ein Drittel der Befragten an, Filme im Unterricht zur Quantenphysik einzusetzen. Die Qualität dieser Filme wird anscheinend als sehr gut eingeschätzt:

Im Unterricht selber zeige ich immer zu Beginn und am Ende des Unterrichts einen Film über Quantenphysik, der wirklich sehr gut ist.

Als kaum verwendetes Medium wurde das Buch von nur drei der Befragten genannt, wobei sich die Frage stellt, ob das Schulbuch von vielen der befragten LehrerInnen einfach vergessen wurde, weil es für sie als zum Unterricht dazugehörend angesehen wird.

Trotzdem dürften gerade in diesem Kapitel der Physik die bevorzugten Medien eher im Bereich der Folien, Experimente und Filme liegen.

Möglicherweise liegt der Grund für die Bevorzugung von den meist selbst gestalteten Folien darin, dass in dem Bereich der Quantenphysik die Unterrichtenden sich lieber auf ein vollständig von ihnen verfasstes Medium stützen, bei dem sie exakt wissen, welche der Phänomene der Quantenphysik sie ansprechen und welche sie zum besseren Verständnis seitens der Schüler noch nicht behandeln. Eine Aussage, die auch ein bisschen in diese Richtung geht, sei noch kurz angeführt:

Overhead- Folien, Experimente, Buch. Sogar relativ viel mit Overhead- Folien, was ich sonst eigentlich nicht mache.

Multimediamaterial im Unterricht zur Quantenphysik

Die Frage nach dem Einsatz von Multimediamaterial ist natürlich schon deswegen interessant gewesen, weil ja in Kapitel 3 Multimediamaterial für den Einsatz im Schulunterricht zur Quantenphysik behandelt wird. Bei der Auswertung der Antworten war ein eindeutiges Ergebnis festzustellen. 13 von 14 Befragten gaben an, keine Computersimulationen zu benutzen. Eine einzige befragte Lehrkraft gab an, Simulationen im Unterricht zu verwenden, weil er/sie ja auch Informatik unterrichtet.

Das Ergebnis ist etwas ernüchternd, aber man sollte auch versuchen die möglichen Gründe zu finden, warum von den doch vorhandenen Möglichkeiten des Einsatzes von Computersimulationen, speziell im Unterricht zur Quantenphysik, so wenig Gebrauch gemacht wird.

Dass die Verwendung von Computersimulationen aus fachdidaktischer Sicht sehr begrüßt und gefordert wird, kann man auch aus der Aussage von Küblbeck und Müller in ihrem Buch „Die Wesenszüge der Quantenphysik“ erkennen:

Unverzichtbar für den Quantenphysik- Unterricht erscheinen uns Computersimulationen von Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten, die eine übersichtliche und leicht zu steuernde Visualisierung der experimentellen Ergebnisse ermöglichen....

(Küblbeck/ Müller 2003, S.145)

Daraus kann man folgern, dass die Gründe des Nichtverwenden von Computersimulationen keinesfalls auf fachdidaktische Bedenken zurückzuführen sind, denn mir ist kein fachdidaktischer Artikel bekannt, der sich gegen den Einsatz von Computersimulationen im Unterricht zur Quantenphysik stellt.

Ein Punkt, der bei der Befragung als Begründung genannt wurde, ist der hohe Zeit- und Arbeitsaufwand, der seitens der Unterrichtenden erforderlich ist. Dabei kann natürlich ein gewisses Unbehagen seitens der Lehrperson gegen die Verwendung des Computers im Unterricht beigemischt sein, wie auch diese Aussage zeigt:

Nein, mit dem Computer sind wir noch nicht soweit. Er ist zwar oben, aber er lässt sich noch nicht so bedienen wie gewünscht. Mit dem kann ich mich nicht beschäftigen, es ist einfach zu zeitaufwendig, da habe ich mit den anderen schulischen Aufgaben zu viel zu tun.

Dazu ist zu sagen, dass die Aussage natürlich richtig ist. Wenn man sich mit den Computersimulationen zum ersten Mal auseinandersetzt, ist sicherlich ein hoher Zeitaufwand aufzubringen. Aber es ist wahrscheinlich kein höherer Aufwand, als wenn man sich zum ersten Mal mit den Schülerversuchen auseinandersetzt oder einen Lernzirkel mit den einzelnen Stationen aufbaut. Somit kann man durchaus dafür plädieren, dass man es zumindest einmal versuchen sollte, Erfahrungen mit Computersimulationen zu machen, um dann zu beurteilen, ob sie eine geeignete Unterrichtsform für den eigenen Unterricht darstellen.

Ein weiterer Punkt, der eine wichtige Rolle spielt, ist die fehlende Information der Unterrichtenden bezüglich der aktuell angebotenen Unterrichtssoftware. Wie dann auch bei den Wünschen zur Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik angegeben worden ist, besteht durchaus Interesse an Computersimulationen, die man im Unterricht einsetzen kann. Antworten, die diese Tendenzen aufzeigen, sind die folgenden:

Wir haben schon Computersimulationen, aber zur Quantenphysik habe ich nichts greifbar.

Von mir aus auch eine CD mit Videos oder eine interaktive DVD, wo man Informationen recherchieren kann, mit Internet Links oder wie auch immer. Ja, ein Portal zur Quantenphysik, ein Internetportal...

Als letzter Punkt, der von den Befragten angesprochen wurde, ist jener zu nennen, dass die Verwendung von Computersimulationen und die damit meist verbundene Benutzung des EDV- Raums auch zu Problemen bei der Aufmerksamkeit der SchülerInnen führen kann:

Computersimulation hab ich schon auch gemacht, mache ich jetzt aber wieder weniger, weil die Kinder dauernd eine Zweittastenbelegung haben und machen dauernd etwas anderes, ohne dass man es merkt. Und dadurch ist der Computer mit der Zeit uninteressant geworden, denn da müsste man ja ununterbrochen wie ein Geier aufpassen. Kann man auch nur machen in einer kleinen Klasse, wo man einen gewissen Überblick hat...

Diese angesprochene Problematik kann sicherlich die Unterrichtsqualität herabsetzen, doch es sollte möglich sein, dies zu verhindern, z.B. indem man zuvor vom Lehrercomputer aus festlegt, welche Internetseiten aufgerufen werden können. Es ist ganz klar, dass dies vielleicht durch einen langwierigen Lernprozess erfolgen muss, bei dem man den Schülern klarmacht, dass die Stunden im Computersaal nicht zum Internetsurfen oder zum Spielen da sind, aber dies sollte meiner Meinung nach gelingen, da ja das Aufmerksamkeitsproblem auch im „normalen“ Unterricht gegeben sein kann.

Welches Buch würden Sie einem interessierten Schüler empfehlen?

Diese Frage sollte eigentlich darauf zielen, wie viele verschiedene Bücher die befragten LehrerInnen angeben können. Außerdem erschien es interessant, ob dann bei diesen genannten Büchern eine Gliederung nach Schwierigkeitsgrad gemacht wird.

Die Antworten auf diese Frage waren aber so, dass auf diese Zielsetzung gar nicht mehr eingegangen werden konnte. Denn alleine fünf der Befragten, also immerhin ein Drittel, gaben an, nicht ein einziges Buch zur Quantenphysik einem interessierten Schüler empfehlen zu können.

Dies liegt aber nicht nur unbedingt am Desinteresse seitens der Unterrichtenden, sondern auch daran, dass die meisten noch nicht in diese Situation gekommen sind, was mich persönlich gerade bei einem Thema, wie jenem der Quantenphysik, doch verwundert:

Das ist eine schwierige Frage. Da würde ich einmal selbst im Internet recherchieren und gegebenenfalls selbst mir diese Titel anschauen, aber bis jetzt hat mich ein Schüler diesbezüglich noch nicht angesprochen. Aber man kann sicher jederzeit Titel, die geeignet sind, ausfindig machen. Wir haben ja auch Spektrum der Wissenschaft abonniert, vielleicht von dort einen Artikel.

Der Großteil der Befragten, nämlich acht, konnte ein Buch angeben, das sie empfehlen würden. Bei den Buchtiteln war die Streuung der Schwierigkeitsgrade sehr groß. Es wurden mehrere populärwissenschaftliche Bücher angegeben oder Bücher, die speziell für Schüler gedacht sind, aber auch Universitätslehrbücher, wie zum Beispiel die Feynman Lectures.

Meiner Meinung nach sind Universitätslehrbücher für die meisten Schüler ein sehr harter Brocken und können bei nicht erfolgter Hilfe des Empfehlenden sehr demotivierend wirken. Überhaupt kann man sagen, dass viele der Befragten sicherlich an die Lehrbücher aus ihrer Studienzeit dachten, wie auch die folgende Aussage zeigt:

Ein Buch zur Quantenmechanik? Es gibt ein Buch von Heisenberg. Ein anderes würde ich nicht empfehlen, denn er bleibt schon auf der zweiten Seite stecken.

Nur zwei der Befragten hatten mehrere Bücher zur Quantenphysik für interessierte Schüler zur Verfügung. Natürlich konnten sie mir nicht alle Titel auswendig herunterbeten, doch wurden mir die Titel per E-Mail gesendet. Eine der Listen umfasste neun Bücher, die auch das schon öfter zitierte Buch „Das Quantenuniversum“ von Hey und Walters beinhaltet und auch sonst einige interessante Bücher, welche relativ leicht verständlich geschrieben sind, wie zum Beispiel „Eine kurze Geschichte der Zeit“ von Stephen Hawking oder „Die großen Physiker und ihre Entdeckungen –Band 2“ von Segré. Was mir sehr gut an dieser Auswahl von Büchern gefallen hat, ist die Tatsache, dass mehrere Zugangsmöglichkeiten zum Thema der Quantenphysik angeboten werden könnten, je nach dem Interessensprofil des jeweiligen Schülers.

Wünsche zur Verbesserung des Unterrichts zur Quantenphysik

Dies war eine der Fragen mit den längsten und ausführlichsten Antworten. Daraus kann man durchaus folgern, dass ein sehr großes Interesse an der Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik besteht und dass seitens der Lehrenden einige Impulse dazu geliefert werden können.

Das meist genannte Thema, das von fast allen der Befragten angesprochen wurde, war jenes der Fortbildung. Viele wollten, dass das Angebot der Fortbildung vergrößert bzw. verbessert wird. Die Bedeutung einer Fortbildung für die Unterrichtenden wird durch folgendes Zitat unterstrichen:

Schauen Sie, das Problem liegt darin, dass ich glaube, dass man in allen Bereichen des Unterrichtes mit einer guten Fortbildung am besten zurechtkommt. Ich meine, man kann sich im Selbststudium immer wieder das eine oder andere aneignen, aber ich beobachte immer wieder, dass man etwas, was man mir nicht vorgetragen hat, also mir unterrichtet hat, das sitzt nie so tief. Das heißt, ich würde gerne wieder eine vernünftige solide Fortbildung in der Quantenmechanik machen. Das würde mir am Herzen liegen...

Das bei einem Thema, wie der Quantenphysik, ein enormes Interesse an Fortbildung besteht, ist meiner Meinung nach nicht verwunderlich. Denn im Bereich der Quantenphysik treten aktuell so viele Anwendungen des alltäglichen Lebens neu auf, wie etwa der Einsatz der Quantenkryptographie zur Verschlüsselung von Banküberweisungen. Das Angebot wird aber seitens der Unterrichtenden als nicht sehr groß empfunden, wie das folgende Zitat zeigt:

Auch Fortbildung ist relativ wenig. Ich hab vor Jahren einmal bei Zeilinger ein Seminar für Lehrer gemacht und wo er das sehr klar gebracht hat, aber sonst sind Lehrer nicht unbedingt die Zielobjekte von irgendwelchen Fachvorträgen.

Doch alleine mit einem größeren Angebot an Fortbildungsangeboten, ist es der Meinung einiger Befragten nach nicht getan. Auch bei der Qualität und Zielsetzung der angebotenen Seminare haben die Befragten einige Bedenken und Wünsche geäußert, wie folgende zwei Zitate recht deutlich veranschaulichen:

Fortbildung wird eigentlich zu wenig angeboten in diesem Bereich, meiner Meinung nach. Wobei das mit der Fortbildung so eine Geschichte ist, denn wenn es einmal zu tief gehend ist, ist das auch wieder ein Problem, denn es sollte ja doch für die Schule anwendbar sein. Das hätte ich mir z.B. bei diesem Seminar erwartet, denn ich habe nichts davon, wenn ich mir die tollsten Sachen ausrechne, die ich dann nicht brauchen kann. Das ist nämlich bei vielen Seminaren grade in der Physik nämlich nicht immer gegeben. Manche sind zu abgehoben und manche zu primitiv, da gibt es beides. Ein Mittelmaß wäre erfreulich.

Ich war einmal bei so einer Fortbildung, aber da ist nicht so viel herausgekommen, weder von den Professoren noch von unserer Seite. Das Ganze ist noch nicht ausgegoren und so aufbereitet, dass es genommen und eins zu eins auf den Schulunterricht übertragen werden kann.

Wie man an diesen Aussagen erkennen kann, gibt es Bedenken, ob die Art der Behandlung des Themas in den Seminaren in der Schulpraxis auch angewendet werden kann. Allerdings soll dies keineswegs bedeuten, dass alle der Befragten unzufrieden mit der angebotenen Fortbildung sind. Es gibt auch Unterrichtende, die sehr positiv über das Fortbildungsangebot urteilen:

Fortbildungen wären nicht uninteressant. Gemacht wird, aber so weit ich weiß schon immer wieder was. Gerade was Quantenphysik anbelangt, da gehen Kolleginnen von mir hin, die recht begeistert sind. Fortbildungsangebot zumindest aufrecht erhalten, soweit es möglich ist.

Bei den Wünschen zur Fortbildung gab es noch eine sehr interessante Aussage, die einen ganz konkreten Punkt angesprochen hat, nämlich ein Seminar zur Wissenschaftsgeschichte, das von Lehrern für Lehrer gehalten werden sollte:

Da fällt mir jetzt auch noch was auf, was ich mir wünschen würde bei der Lehrerfortbildung, dass es sozusagen Seminare zur Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte gibt. Ich hab das einmal auf der Philosophie auch einmal studiert. Auf der Philosophie in der Erkenntnistheorie: Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte als erkenntnistheoretisches Thema, aber gerade für Lehrer wäre es wichtig, dass sie gerade die Nahtstellen, also die wichtigen Entscheidungen möglichst authentisch rüberbringen. Was ist da passiert? Welche Entscheidungen sind angestanden? Und warum ist dann daraus eine Erkenntnis geworden? Da gibt's so Milestones, und das ist so ein Milestone. Und Lehrer, die nach 20-30 Unterrichtsjahren auf Unterrichtsgeschichte zurückgreifen, die haben das, weil sie sich darum gekümmert haben, weil sie es gelesen haben oder dafür interessiert haben.

Es wurde aber nicht nur mehr Fortbildung gewünscht, sondern es wurden auch noch zwei weitere Themen angesprochen. Einerseits der Wunsch nach mehr Multimediamaterial für den Unterricht, vor allem Filme und Computersimulationen bei rund einem Drittel der Befragten, andererseits eine Verbesserung der Möglichkeiten zum Austausch zwischen Schule und Universität.

Beim erstgenannten Punkt ist einfach ein starker Wunsch nach mehr Unterrichtsmaterialien zu verspüren, den man auch an den Aussagen deutlich machen kann:

Also wenn zum Beispiel Filme oder Multimediasachen zur Verfügung stehen, ist dann sicher auch nicht schwierig, die dann einzusetzen und auch umzusetzen. Nur sich das selber zusammen zu suchen ist gerade auf diesem Gebiet sehr schwierig.

Ich hätte gerne gute Materialien und Multimedia, das wäre ideal. Die Videos die ich kenne, kann jetzt keines namentlich nennen, die sind auf einem Niveau, das einfach nicht passt. Die sind auf der einen Seite, sind sie sehr anschaulich, auf der anderen Seite verschleiern sie aber zuviel, das heißt ich hätte gerne etwas was ein bisschen exakter ist, aber auf einem bisschen höheren Niveau. Also nicht diese Art Quantenmechanik für den Mann von der Straße, das ist mir halt ein bisschen zuwenig, vielleicht als Einstieg, und das andere Extrem ist sofort irrsinnig viel Mathematik, was in der Schule auch nicht geht.

Diese Aussagen zeigen deutlich, dass durchaus die Bereitschaft zum Unterricht mit Multimediamaterial und dem Einsatz von Videos vorhanden ist, doch das Problem liegt in der Beschaffung und Sondierung solcher Materialien. Diesen Schwierigkeiten wird auf verschiedenen Internetseiten schon entgegengesteuert, doch dies muss sich noch bei den meisten LehrerInnen herumsprechen und vielleicht besser beworben werden.

Beim zweiten angesprochenen Punkt, dem verstärkten Austausch zwischen Universität und Schule, geht es den Befragten darum, einen direkten Kontakt zur Hochschule herzustellen, sei es durch Gastvorträge in den Schulen oder mittels Exkursionen zu den Labors in den Instituten, wie die Zitate belegen:

Cool wäre es, wenn man ab und zu einen Assistenten oder Professor auf Schulniveau einmal einladen könnte, dass er einmal eine Stunde hält. Oder auch für Fragen zur Verfügung steht. Oder

vielleicht über sein Forschungsgebiet erzählt. Was sonst noch toll wäre, wären Exkursionen zu Experimenten, so wie z.B. Zeilingergruppe oder so etwas Ähnliches.

Aber was vielleicht doch interessant wäre, sie haben ja doch einige Experimente stehen, und da wäre es schön, wenn das Angebot da wäre, dass man mit einer Schulklasse dort hinkommen kann. Tage, wo man sagt, an dem kann man sich anmelden und dann mit einer Schulklasse hinkommt. In dem Wohnblock haben sie ja die Experimente aufgebaut. Und dann gibt's ja oben auch noch so Experimente zum Atomaufbau und diese Großmoleküle, oder dass einmal das VERA herzeigen..... Wenn sie das ein bisschen mehr für Schüler zugänglich machen würden. Dass sie schon mindestens zwei Dinge auf einmal zeigen, damit sich die Zeit rentiert, die man durch Hin- und Zurückfahren verbraucht. Wenn möglich aufbereitet für Schüler, auf möglichst einfachen, auch wenn dann nicht so exakt ist, so einfach wie möglich kurz erklärt und auch in kleineren Gruppen. Teilung der Klasse.

Meiner Meinung nach ist hier das Problem ähnlich gelagert wie bei der Beschaffung der Multimediamaterialien, es fehlt oft an der Kommunikation unter den Unterrichtenden. Denn es gibt durchaus seitens der Universität das Bemühen, Schülern einen Einblick in die neueren Experimente zu ermöglichen. Zum Beispiel wurde auf der Fortbildungswoche des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts ein Informationsblatt verteilt, auf dem die möglichen Exkursionstermine, in den letzten zwei Schulwochen der Physikalischen Institute der Universität Wien aufgelistet sind, ebenso wie die jeweiligen Personen zur Kontaktaufnahme.

Dass man nicht alle Experimente mit Schülern besichtigen kann, liegt auch oft am Platzproblem, da viele der Experimente in Räumen untergebracht sind, bei denen sich maximal fünf bis zehn Schüler aufhalten können. Die verschiedenen Institute werden sicherlich nicht immer Zeit haben, auf alle Besichtigungswünsche einzugehen, aber bei rechtzeitiger Kontaktaufnahme werden viele bemüht sein, ihr Möglichstes zu tun. Ebenso wird ein Gastvortrag durch einen Professor an einer Schule kein allzu großes Problem darstellen, wobei natürlich immer zu beachten ist, dass die Terminplanung lange im Voraus zu betreiben ist.

Abschließend kann man sagen, dass es wünschenswert wäre, wenn die Kommunikation unter den Lehrenden sich verbessern würde. Es gibt schon viele Projekte und Arbeitsgruppen, die dies erfolgreich praktizieren, doch sollte sich die Zusammenarbeit

unter den LehrerInnen noch mehr ausweiten, denn wenn viele ihre Informationen und ihr Wissen den Kollegen zur Verfügung stellen würden, dann wäre sicherlich ein Hindernis auf dem Weg zu einer effizienteren Unterrichtsgestaltung geebnet.

Verwendete Unterrichtseinheiten für den Block Quantenphysik

Die Frage nach der Zeitspanne, die für den Unterricht der Quantenphysik verwendet wird, hat eine Verteilung ergeben, die ziemlich interessant ist. Es gibt anscheinend zwei Zeitintervalle, die von den Unterrichtenden verwendet wird. Der erste Zeitintervall enthält ca. 10 Unterrichtseinheiten und der andere Zeitabschnitt pendelt sich bei ca. 20 Unterrichtseinheiten ein.

An den Antworten kann man erkennen, dass es eine Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis gibt. Bei dem Unterrichtskonzept, das in dem sehr guten Buch „Wesenszüge der Quantenphysik“ von Küblbeck und Müller dargelegt wird, ist der Zeitrahmen wie folgt geplant:

Für eine gründliche Einführung in die Wesenszüge einschließlich einer quantitativen Beschreibung (z.B. mit den Zeigern) muss man etwa vierzig Stunden veranschlagen....

(Küblbeck/ Müller 2003, S.138)

Das heißt, dass auch bei dem größten Zeitrahmen, der von den Befragten eingeräumt worden ist, sich dieses Konzept sicherlich nicht eins zu eins im Unterricht umsetzen lässt.

Bei den Antworten, die einen kürzeren Zeitrahmen von ca.10 Stunden vorsehen, werden auch Gründe dafür genannt:

Das ist schwierig, weil Atomphysik und Quantenphysik fließend ineinander übergehen. Da sind die Schularbeiten, das wird natürlich auch nicht beachtet, da sind lauter drei vierstündige Schularbeiten, und wenn es das Pech will, ist man dauernd hinter den Schularbeitsfächern eingeteilt und verliert so viele Stunden. So ca. 10 Stunden werden sich aber schon ausgehen. Prinzipiell so viel wie möglich, aber irgendwann ist dann die Achte aus.

Die angesprochene Problematik mit den Schularbeiten in der achten Klasse wird wohl nur schwer abzuändern sein. Bei dem Punkt des Zeitdrucks, der durch das kürzere Schuljahr in der achten Klasse entsteht, scheint sich ja durch den neuen Lehrplanentwurf eine Entspannung zu ergeben, da in dem neuen Lehrplan die Anordnung des Themas Quantenphysik schon durchaus am Anfang der siebenten Klasse erfolgen kann.

Mit dieser neuen Vorgabe wird es für viele LehrerInnen leichter, denn dass auf jeden Fall bei vielen der Befragten die Bereitschaft, auch die moderne Physik zu unterrichten, vorhanden ist, kann man auch anhand der folgenden Aussage sehr gut erkennen:

Im RG 8-10 Stunden, weil es wird sich eher am Ende der achten Klasse ausgehen, weil für mich ist persönlich ein Fixpunkt in der achten Klasse die Relativitätstheorie, das nehme ich mir einfach vor und wenn ich auch irgend etwas anderes auslassen muss, da mache ich lieber den Strom kürzer, wenn mir von der siebten etwas überbleibt, was ja meistens der Fall ist . Aber ich gehe schon davon aus. Die Schüler sollten von der Physik des 20. Jahrhunderts schon etwas gehört haben. Es soll Physik nicht so betrieben werden, dass Induktion und Transformator die letzten Kenntnisse sind, denn da sind wir ungefähr in der Physik Mitte des 19. Jahrhunderts und dann ist es aus. So sollte es ja auch nicht sein.

Zeitpunkt des Unterrichts der Quantenphysik

Die Antworten gaben nicht nur Auskunft über den Zeitpunkt der Behandlung der Quantenphysik, sondern verschafften auch noch einen Überblick, welche weiteren Themen in der achten Klasse unterrichtet werden.

Viele Antworten gingen in die Richtung, dass in der achten Klasse drei größere Blöcke behandelt werden, wie auch die folgende Aussage zeigt:

Ich habe drei große Blöcke: Allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie, ich bezeichne es eher als Teilchenphysik. Wenn man es drittelt, komme ich auf zweieinhalb Monate für die Quantenphysik.

Allerdings gibt es bei den Blöcken einen Punkt, bei dem die Aussagen variieren, nämlich anstatt der Kosmologie wurde auch oft als dritter Block die Elektrodynamik genannt.

Bei dem Zeitpunkt wurde von neun der Befragten angegeben, dass sie die Quantenphysik eher gegen Ende der achten Klasse durchnehmen. Das sind immerhin ca. zwei Drittel der Befragten. Bei drei der Antworten wurde die Mitte des ersten Semesters als Zeitpunkt der Auseinandersetzung mit dem Thema genannt.

Damit ist beim überwiegenden Teil die Quantenphysik mehr oder weniger das Schlussthema des gesamten Schulunterrichts. Meiner Meinung nach ist die Aufmerksamkeit der Schüler zu diesem Zeitpunkt nicht mehr so groß wie zum Beispiel im ersten Semester, da knapp vor der Reifeprüfung einige Schüler sicherlich nur noch auf die Fächer fokussiert sind, in denen sie bei der Matura antreten. Gerade bei der Quantenphysik, deren Faszination sicher von den sehr verwunderlichen Eigenschaften und Voraussagen ausgeht, bedarf es aber eines gewissen Grades an Aufmerksamkeit seitens der Schüler, damit das im Unterricht Vorgetragene innerlich und in der Diskussion mit dem Vortragenden verarbeitet werden kann.

Typische Fragen der Schüler zur Quantenphysik

Die Zielsetzung dieser Frage war, einen Einblick zu erhalten, bei welchen Gebieten der Quantenphysik Probleme mit dem Verständnis seitens der Schüler auftreten.

Der am häufigsten genannte Begriff, der den Schülern Probleme bereitet, ist der des Welle-Teilchen- Dualismus. Alleine fünf der Befragten haben diesen Begriff genannt. Stellvertretend für diese kann man diese Aussagen anführen:

Welle-Teilchendualismus. Das ist ein Problem, mit dem die Schüler wirklich kämpfen. Das ist wahrscheinlich hervorgerufen durch das Entweder- Oder Denken.

Dieses Wellenmodell. Vor allem, wenn man sagt, man kann sich auch einen Festkörper als Welle vorstellen, da tauchen sofort Diskussionen auf....

Allgemein waren die Aussagen bei dieser Frage nicht so ergiebig wie erwartet, es wurden mehr allgemeine Aussagen über die Probleme mit den Themen der modernen Physik getätigt, wie etwa die folgende:

Ich kann das nur allgemeiner formulieren. Es ist überall dort auch für die Schüler abstrakt und schwierig, wo sich die Physik sehr stark aus dem entfernt, was wir mit unseren eigenen Sinnen hören, sehen, wahrnehmen können. Nachdem vieles, was die Strukturen betrifft, sehr klein und auf das andere Gebiet bezogen, die Lichtgeschwindigkeit sehr groß ist, ist das einmal aus dem Erfahrungsbereich, aus dem unmittelbaren Erfahrungsbereich im Alltag der Schüler nicht so greifbar, und das macht auch ganz sicher die Schwierigkeit aus mit der wir da konfrontiert sind, da bin zu 100% davon überzeugt...

Es gab schon noch Begriffe, die angesprochen wurden, wie etwa Energieniveaus, Aufenthaltswahrscheinlichkeit oder Beamen. Allerdings wurden die Begriffe von nur jeweils einem Befragten genannt und die Aussagen darüber waren nicht sehr aufschlussreich.

Es gab bei der Beantwortung dieser Frage Antworten, die nicht unbedingt mit der Zielsetzung dieser Fragestellung in Zusammenhang standen, da aber vier der Befragten dieses Thema ansprachen, erscheint es durchaus erwähnenswert:

Was immer ein Phänomen ist, das fällt mir jetzt nur nebenher ein, dass für mich über Jahre hinweg zu beobachten ist, dass Schüler, die z.B. Elektrodynamik, Rechenbeispiele, usw. sehr gern haben, oft wesentlich weniger Interesse entwickeln für die Quantenphysik, sondern mehr Schüler die ein bisschen philosophisch angehaucht sind und ganz andere Leute, die vorher in Physik eher so ein Dasein geführt haben, dass sie möglichst nicht angesprochen werden wollten, dort aufblühen und die Thematik genießen. Das ist jedes Jahr dasselbe.

I: Quantenphysik interessiert nicht nur die Schüler, die sowieso an Physik interessiert waren?

Ja richtig, sondern eher die philosophisch Interessierten. Erkenntnissachen. Das wird aber auch am Unterricht liegen, weil ich's auch mehr in diese Richtung anlege und nicht mehr aufs Rechnen hin anlege, sondern eben auf die Erweiterung in ihrem Denken.

...diese Sprachlosigkeit und das geht ja dann in die Philosophie hinein, weil du es ja nicht ausdrücken kannst, weil sich niemand so verhält, das geht bei den Kindern schon, auch bei denen, die eigentlich nicht physikalisch interessiert sind oder so technisch interessiert, sondern eher die Fragen: „Ich will wissen, was die Welt im Innersten zusammenhält.“ Die von der „Faust“ Seite kommen.

Wie man an den Aussagen erkennen kann, ist die Thematik der Quantenphysik auch für jene Schüler interessant, die vielleicht eher einen philosophischen Zugang zur Welt haben

und sich nicht unbedingt für naturwissenschaftliche oder technische Themen interessieren. Meiner Meinung nach ist dies eine gute Möglichkeit, auch bei diesen Schülern Interesse an der Naturwissenschaft zu wecken. Allerdings sollten dazu diese Diskussionen im Unterricht nicht erst am Ende der Schullaufbahn geführt werden, sondern schon früher. Denn wenn sogar noch am Ende Interesse zu wecken ist, dann sollte man die Chance nützen und dies schon vorher tun, denn dann kann vielleicht ein größerer Anteil den Physikunterricht mit Interesse und Motivation verfolgen.

2.4 Zusammenfassung

Die Zusammenfassung soll noch einmal kurz Ergebnisse darstellen und einen kleinen Überblick über den Unterricht an den Schulen geben.

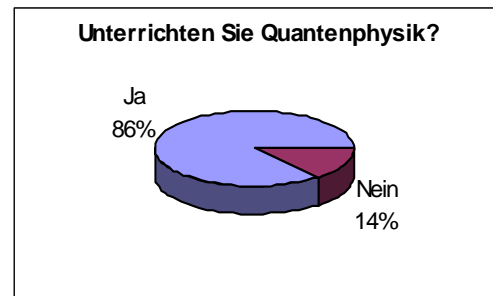
- Von den 14 Befragten gaben zwei an, die Quantenphysik nicht zu unterrichten.
- Bei der Bewertung der einzelnen Begriffe haben der Photoeffekt, die Unschärferelation und das Bohr'sche Atommodell am besten abgeschnitten, im Gegensatz zum EPR- Paradoxon, das am schlechtesten bewertet wurde.
- Bei den Begriffen, die ein Schüler in eigenen Worten erklären können sollte, wurde die Heisenbergsche Unschärferelation am häufigsten genannt, knapp gefolgt vom Doppelspaltexperiment und dem Photoeffekt.
- Bei dem Erwerb des Wissens zur Quantenphysik der Unterrichtenden waren drei Quellen zu benennen: Studium, Fortbildung und Selbststudium mit Büchern. Diese Quellen, bereichert durch das Internet und Zeitschriften, bilden auch die Materialien zur Unterrichtsvorbereitung.
- Bei den im Unterricht verwendeten Medien wurde an erster Stelle die Overhead-Folie genannt, gefolgt von Experimenten und dem Einsatz des Buchs.

- Bei der Frage nach dem Einsatz von Multimediamaterial gaben 13(!) der 14 Befragten an, es im Unterricht zur Quantenphysik zu verwenden.
- Allerdings wurde bei den Wünschen zur Verbesserung des Unterrichtens der Quantenphysik die Bereitstellung von Multimediamaterial von mehr als einem Drittel als Wunsch geäußert.
- Bei den Wünschen wurde aber an erster Stelle ein größeres und an die Bedürfnisse der Schule angepasstes Fortbildungsangebot vorgebracht. Außerdem besteht das Bedürfnis nach einem verstärkten Austausch zwischen der Universität und den Schulen, in Form von Exkursionen und Gastvorträgen.
- Bei der Frage nach einem zu empfehlenden Buch gab es sehr große Unterschiede. Während fünf der Befragten gar kein Buch angeben konnten, konnte der „Spitzenreiter“ gleich neun Werke empfehlen.
- Die Anzahl der verwendeten Unterrichtseinheiten liegt zwischen 8 und 20, die von einem Großteil der Unterrichtenden eher am Ende der achten Klasse in ihrem Jahresplan platziert werden.
- Bei den Schülerfragen hat sich vor allem der Begriff des Welle- Teilchen Dualismus als größtes Problem herausgestellt.
- Als weitere Erkenntnis der Befragung kann man anführen, dass im Unterricht zur Quantenphysik verstärkt auf die Thematik der Modellbildung in der Physik eingegangen wird.
- Auch der wissenschaftshistorische Aspekt, wie z.B. die Kontroverse zwischen Bohr und Einstein, wurde von einigen Befragten stark betont.
- Einige Befragte äußerten spontan, dass durch die Verknüpfung von Physik und Philosophie in der Quantenphysik auch von Schülern Interesse gezeigt wird, die ansonsten im Physikunterricht nicht so „aufblühen“.

Kurzzusammenfassung der Lehreraussagen

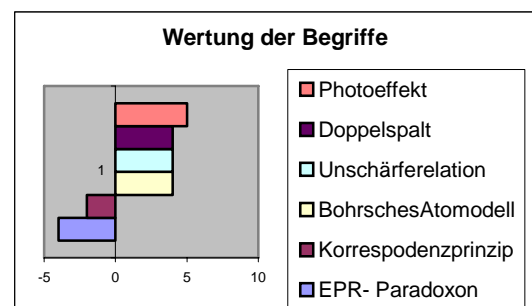
Zu den zusammenfassenden Aussagen der 14 befragten LehrerInnen werden noch ein paar graphische Darstellungen zur Illustration der Ergebnisse beigelegt.

Die erste Frage, ob die Quantenphysik unterrichtet wird, ergab ein Ergebnis, welches rechts dargestellt wird. Die Prozentzahlen sind sicherlich nicht statistisch erhärtet. (14 Befragte)



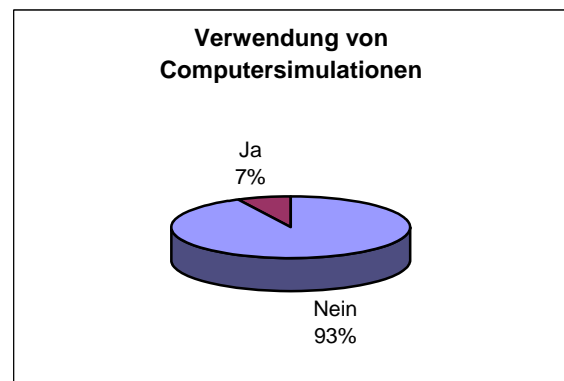
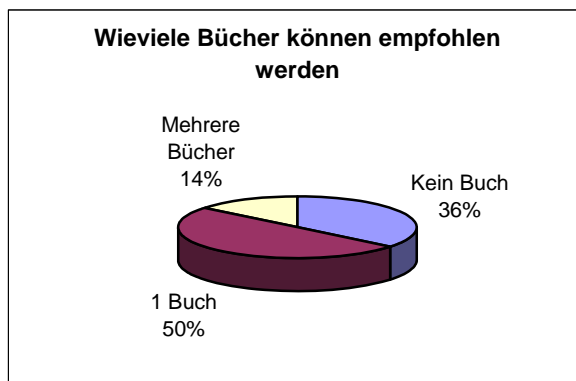
Zur Wertung der Begriffe wurde die Note drei als Nullwert festgelegt (siehe rechts). Damit erkennt man die Wertung deutlicher.

Bei der Frage, welche Begriffe Schüler in eigenen Worten erklären können sollen, kam eine beinahe idente Wertung heraus.



Beim Wissenserwerb zur Quantenphysik gab es keine großen Überraschungen. Die drei häufigsten gegebenen Antworten waren Studium, Selbststudium und Fortbildung. Bei den Materialien zur Unterrichtsvorbereitung waren auch keine Überraschungen dabei und eine graphische Darstellung scheint mir nicht sinnvoll. Die Befragten nannten in erster Linie Bücher und danach, deutlich abgeschlagen, das Internet und wissenschaftliche Artikel.

Eine Veranschaulichung zur Aussagenverstärkung bietet sich noch bei zwei Antworten an: Bei der Frage nach Büchern, welche interessierten Schülern empfohlen werden können und bei der Frage, ob Computersimulationen im Unterricht verwendet werden.



Aus diesen Ergebnissen kann man, meiner Meinung nach, folgende Erkenntnisse gewinnen. Erstens ist der Unterricht der Quantenphysik schon ein fixer Bestandteil des Unterrichts an den Schulen. Die Zeitspanne, in der die Quantenphysik unterrichtet wird, ist gar nicht einmal kurz, auch wenn die zeitliche Platzierung am Ende der letzten Klasse eher ungünstig erscheint.

Bei der Bewertung der Begriffe ist jene Gewichtung aufgetreten, die zu erwarten war. Dass trotz der andauernden Kritik seitens der Fachdidaktik das Bohr'sche Atommodell als immer noch so wichtig angesehen wird, kann wahrscheinlich nur damit begründet werden, dass es das letzte „anschauliche“ Modell ist.

Der Einsatz von Multimediamaterial im Unterricht zur Quantenphysik findet noch nicht statt, aber es gibt ein doch recht beachtliches Interesse an Materialien, die dann im Unterricht eingesetzt werden können. Damit wird sich auch das folgende Kapitel drei auseinandersetzen.

Insgesamt möchte ich noch anmerken, dass bei fast allen der Befragten ein großes Interesse an dem Thema der Befragung festzustellen war. Dies ist sicherlich sehr erfreulich, weil Interesse und Begeisterung seitens der Unterrichtenden einen motivierten und für die Schüler motivierenden Unterricht erwarten lässt.

3. Computereinsatz im Unterricht zur Quantenphysik

In diesem Kapitel soll ein Einblick in die Möglichkeiten des Computereinsatzes zum Unterricht der Quantenphysik gegeben werden. Die Bedeutung des Computers und dessen Anwendungen sind ja aus dem Alltag bekannt und nehmen auch im Unterricht einen immer größeren Anteil ein. Zusätzlich ergibt sich durch die in ihrer Anzahl immer stärker ansteigenden Notebookklassen auch ein viel größeres Anwendungsgebiet, da der Computer in jeder Unterrichtseinheit zur Verfügung steht. Prinzipiell ist dieser Trend im Sinne eines modernen Unterrichts sehr zu begrüßen, auch wenn keineswegs der Einsatz des Computers als das Allheilmittel für einen interessanten und lehrreichen Unterricht gesehen werden darf.

Doch gerade bei einem Thema wie dem der Quantenphysik ergeben sich durch den Einsatz des Computers ganz neue Perspektiven, da die experimentellen Möglichkeiten im Bereich der Schule doch schnell erschöpft sind. Deswegen ist hier eine Chance gegeben, die Unterrichtsqualität durch sinnvollen Einsatz von Simulationen zu steigern.

In dem ersten folgenden Unterkapitel werden allgemeine Folgerungen beleuchtet, die sich durch den Einsatz von Computern ergeben. Es ändert sich ja nicht nur die Arbeitsweise der Schüler, sondern auch das Anforderungsprofil für die Unterrichtenden unterzieht sich einer Wandlung.

Im zweiten Abschnitt soll dargestellt werden, welche Argumente seitens der Fachdidaktik für den Einsatz von Simulationen, speziell im Unterricht der Quantenphysik, sprechen. Dazu soll noch angesprochen werden, welche neuen Möglichkeiten sich dadurch ergeben.

Im dritten Abschnitt werden dann einige Computersimulationen aus dem Internet vorgestellt, die von fachdidaktischen Gruppen erstellt worden sind. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf dem Projekt „Visual Quantum Mechanics“, oder kurz VQM, von der Kansas University liegen, bei dem ein sehr großes Angebot an Simulationen zur Verfügung gestellt wird. Es sollen dabei nicht nur die einzelnen Materialien abgehandelt werden, sondern auch kurz berücksichtigt werden, mit welchen Simulationen welche Lehr- und Lernziele abgedeckt werden können.

Im vierten Unterkapitel werden dann noch kurz Arbeitsmaterialien zu einem Teil der vorher besprochenen Simulationen vorgestellt. Ebenfalls in diesem Abschnitt enthalten ist ein kurzer Bericht, wie denn die Erprobung im Unterricht funktioniert hat und welche Schlüsse sich daraus ziehen lassen.

3.1 Allgemeine Bemerkungen zum Einsatz des Computers im Unterricht

Bei dem Computereinsatz im Physikunterricht müssen sicherlich viele Dinge beachtet werden, damit durch denselben eine Verbesserung der Unterrichtsqualität erreicht wird und nicht das Gegenteil. Dies wird auch seitens der Fachdidaktik so gesehen:

Die Didaktik stellt nicht die technischen Möglichkeiten neuer Medien in den Mittelpunkt, sondern die potentiellen Beiträge zum Lernen. Aber auch mögliche Schwierigkeiten beim Einsatz in der Praxis müssen beachtet, sinnvolle Lösungen dafür entwickelt und kritisch geprüft werden.

(Girwidz 2002, S.230)

Dieser Meinung schließt sich auch Andrea Mayer an, die Gestalterin der Internetplattform www.physicsnet.at, die zum Einsatz und dem Potential der neuen Medien folgendes sagt:

Der Einsatz von neuen Medien im Unterricht darf aber nicht zum Selbstzweck erfolgen. Nicht die modernste Hardwareausstattung, ein großer Softwarepool und ein schneller Internetanschluss sind die primären Ziele. Vielmehr geht es darum, welche Bildungsprobleme mit den neuen Medien besser gelöst werden können als mit herkömmlichen Mitteln. Benötigt werden deshalb Konzepte, die zeigen, wie das Potential der Neuen Medien für die Unterstützung von neuen Lehr- und Lernformen und dem Arrangieren neuer Lernsituationen konkret ausgeschöpft werden kann. Dabei sollen Konzepte für den Unterricht bevorzugt werden, die den Einsatz des Computers und des Internets dazu nutzen, konstruktive Aktivitäten, Selbststeuerung, Reflexion und Kooperation der Lernenden zu fördern. Herkömmliche Unterrichtsstrukturen können so in Richtung problemorientierte Lernumgebungen verändert werden.

Es stellt sich die Aufgabe, didaktische Konzepte für Lernsituationen ohne Computer auf computergestützte Lernumgebungen zu erweitern. Hierbei wird eine Orientierung an folgenden zugrunde liegenden Lernphilosophien zweckmäßig sein: Konzept der Problemorientierung, Konstruktivismus, selbst gesteuertes Lernen und eigenverantwortliche (selbsttätige) Arbeitsformen.

(Mayer 2003, S.8)

An diesen Aussagen kann man erkennen, dass bei der Veränderung der Unterrichtsstrukturen in Richtung problemorientierte Lernumgebungen, ein neues Rollenverständnis seitens der Unterrichtenden nötig sein wird und dass sich auch bei den Möglichkeiten der Arbeitsgestaltung seitens der Schüler neue Perspektiven ergeben werden. Was kann man aber überhaupt unter dem Begriff der problemorientierten Lernumgebungen verstehen?

Die wichtigsten Merkmale problemorientierter Lernumgebungen nennen Prenzel, Senkbeil, Ehmke, Bleschke (2002, S.22):

- Die SchülerInnen lernen selbst gesteuert, indem sie in zunehmendem Maße selbst über Lernzeiten, Lernmethoden und Lernziele entscheiden.
- Die SchülerInnen sind aktiv am Lernprozess beteiligt, anstatt ihm nur passiv zu folgen.
- Das Lernen ist situativ, indem es immer in einen spezifischen Kontext eingebunden wird und nicht abstrakt bleibt.
- Das Lernen ist sozial und kooperativ, da es als interaktives Geschehen verstanden und praktiziert wird.
- Lehrende leiten in angepasstem Maße an und bieten gezielt instruktionale Unterstützung.

Die gleichen Autoren geben auch das Potential der computerbasierten Lernumgebungen für das selbst gesteuerte Lernen an, das durch die folgenden Möglichkeiten gegeben ist (2002, S.28):

- Der Lernende kann Lerntempo und Lernzeit selbst steuern.
- Der Lernende kann seine Lernschritte selbst auswählen und sequenzieren.
- Der Lernende kann auf viele Symbolsysteme rasch zurückgreifen.
- Der Lernende kann Prozesse und Phänomene simulieren und manipulieren.
- Der Lernende kann selbstständig Hypothesen generieren und testen.
- Der Lernende kann selbst multiple Perspektiven aufbauen.

Anhand dieser Möglichkeiten kann man erkennen, dass der Zugang mittels der Problemorientierten Lernumgebungen einen durchaus viel versprechenden Ansatz zum Einsatz des Computers im Schulunterricht darstellt.

In der Studie „Webphysics“ von Andrea Mayer werden auch noch Voraussetzungen nach Weinert (1982, S.102f.) genannt, damit selbstgesteuertes Lernen stattfinden kann.

- In der Lernsituation müssen Spielräume für die selbstständige Festlegung von Lernzielen, Lernzeiten und Lernmethode vorhanden oder erschließbar sein.
- Der Lernende muss diese Spielräume wahrnehmen und tatsächlich folgenreiche Entscheidungen über das eigene Lernen treffen und diese wenigstens zum Teil im Lernhandeln realisieren.
- Dabei übernimmt der Lernende zugleich die Rolle des sich selbst Lehrenden (Selbstinstruktion: Lernwege planen, notwendige Informationen beschaffen, etc.)
- Lernrelevante Entscheidungen müssen zumindest teilweise auch subjektiv als persönliche Verursachung der Lernaktivitäten und Lernergebnisse erlebt werden.

Mayer sieht multimediale Lernumgebungen als besonders geeignet um selbst gesteuertes Lernen im Unterricht zu betreiben:

Mit Hilfe von multimedialen Lernumgebungen kann selbstgesteuertes Lernen direkt oder indirekt stattfinden: Die direkte Förderung kann in Form eines Strategietrainings (z.B. Kontroll- und Selbstreflexionsstrategien) erfolgen, die indirekte Förderung beinhaltet die Bereitstellung und Gestaltung der Lernumgebungen (Lerntempo, Sequenzierung der Lerninhalte, Menge und Art der Lernmaterialien, etc.). Hierbei werden multimediale Lernumgebungen als besonders geeignet gesehen, da sie ein hohes Maß an Interaktions- und Explorationsmöglichkeiten und insbesondere Interaktivität bereitstellen.

(Mayer 2003, S.9)

Meiner Meinung nach sind diese didaktischen Überlegungen als durchaus positiv zu bewerten. Der Einsatz von neuen Medien wird sicherlich eine Menge neuer Unterrichtsideen und Konzepte erforderlich machen, und die hier oben angeführten stellen sich sehr schlüssig und machbar dar. Neu zu definieren wird sicher die Rolle der Lehrperson sein, und einige Punkte dieser neuen Aufgaben, die bereits kurz erwähnt

wurden, sollen hier kurz dargestellt werden, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben oder aussagen zu wollen, dass die angesprochenen Änderungen im Unterrichtsverhalten als verpflichtend für einen Einsatz des Computers im Unterricht angesehen werden.

Veränderungen in der Rolle der Lehrperson

In einem Skriptum von Andrea Kiss (2003, S.4-6) werden im Rahmen eines Notebookseminars der Naturwissenschaftlichen Werkstätte viele interessante Punkte aufgezählt, in welcher Weise sich die Tätigkeiten der Lehrpersonen verändern werden bzw. welche neuen Aufgabenstellungen durch den Einsatz des Computers und des Internets entstehen. Es werden die Punkte nur auszugsweise angegeben:

- Die Lehrperson wandelt sich von der aktiven hin zu einer reaktiven Position – zum Lernbegleiter: vom Anleiten und Erklären hin zum Unterstützen, Anregen und Beraten.
- Lehrerinnen und Lehrer lernen gemeinsam mit ihren Schülern. Dazu notwendig ist aber die Haltung, sich selbst als Lernende und nicht ausschließlich als besser Wissende „Beibringer“ zu verstehen. LehrerInnen werden von „Informations-Lieferanten“ zu „Lernhelfern“.
- Der Lehrer muss der „Modell- Lerner“ für seine Schüler werden.

Diese drei Punkte sprechen das Verhalten seitens der Unterrichtenden in der Schulstunde an. Alle drei Punkte geben an, dass sich die Position des Lehrers vom aktiven „Wissensbeibringer“ zum reaktiven Moderator, der den SchülerInnen als unterstützende Lernhilfe zur Verfügung steht, wandelt. Dies kann man auch an einem weiteren Punkt erkennen, nämlich der Umstellung auf die individuellere Betreuung der einzelnen Schüler.

Weitere Punkte, die die Unterrichtenden berücksichtigen sollten, sind jene, die vor allem Aspekte der Unterrichtsplanung und der sich anzueignenden Fähigkeiten ansprechen:

- Die Bereitschaft zum ständigen Weiterlernen, z.B. auf folgenden Gebieten (neben der Kenntnis von Hard- und Software):
 - Entwicklung einer von Offenheit geprägten curricularen Struktur
 - Zeitgemäße Medienpädagogik mit entsprechender Didaktik und Methodik
 - Genaue Kenntnis der Risiken und Gefahren, die mit dem Einsatz der neuen Medien verbunden ist
- Entwicklung neuer Formen der Überprüfung des Leistungsstandes und zur Überprüfung der Eigenständigkeit der Leistungen; alternative Formen der Leistungsbeurteilung. Nicht nur inhaltliche Aspekte, sondern auch der Prozess und die Erlangung von Kompetenzen neben der Fachkompetenz soll ein Teil der Beurteilung sein.
- Für die Unterrichtsgestaltung sollte sich die Lehrkraft z.B. folgende Fragen überlegen:
 - Ständiger oder zeitweiser Einsatz des Computers in der Stunde?
 - In welchen Unterrichtsphasen erfolgt der Einsatz und warum?
 - Welche Unterrichtsformen werden eingesetzt?
 - Welche Regeln sollen beim Unterricht mit dem Computer aufgestellt werden?
- Eine detaillierte Vor- und Nachbereitung des Unterrichts im Hinblick auf die neuen, spezifischen Lernbedingungen.
- Die Stundenplanung sollte exakt und dennoch flexibel sein, um Leerlaufphasen und die daraus resultierenden privaten Aktivitäten der Schüler wie Surfen, Chatten, Mailen, Versenden von SMS während des Unterrichts nach Möglichkeit auszuschalten.
- Kritische Überprüfung von Informationsressourcen auf deren Tauglichkeit.

Wenn man diese doch recht ausführliche Liste an Aspekten sieht, die bei der Unterrichtsplanung zu berücksichtigen sind, dann kann man erkennen, dass durch einen forcierten Einsatz des Computers im Unterricht einiges an Arbeit auf den Lehrenden zukommt und ein sicherlich großer Zeitaufwand erforderlich ist, um ein gutes Konzept zu erarbeiten und im Unterricht zu realisieren. Allerdings hat man durch diese zeitaufwändige Vorbereitung vor dem Unterricht in der Stunde wesentlich mehr Zeit, sich mit den

Problemen der SchülerInnen zu beschäftigen und ihnen Hilfestellung zu geben, wie auch in der Studie von „Webphysics“ von Mayer angegeben wird:

Die Praxis zeigt bei Mitverwendung des Internets im Unterricht einen weiteren Aspekt: Die Lehrkraft wird während der unterschiedlichsten Arbeitsaufgaben am Computer (bei gut gestalteten Materialien) nicht im selben Ausmaß benötigt wie bei den anderen Aufgabenstellungen. Sie kann somit innerhalb der Unterrichtsphasen mehr Augenmerk und Zeit auf diejenigen Schüler/-innen verwenden, die gerade experimentell arbeiten, ihre Unterlagen zusammenstellen, individuelle Hilfestellung benötigen oder Problemstellungen diskutieren. Hier kann die Lehrperson beratend und unterstützend helfen und sich dabei auf einzelne Schüler/-innen und deren Lernfortschritt konzentrieren. Verständnisprobleme können so auch in kleinem Rahmen diskutiert werden, schwächere Schüler gefördert und gute Schüler zu erweiternden Kenntnissen und vertieftem Wissen angeregt werden. Allerdings gilt hier, wie bei allen eigenverantwortlichen und selbsttätigen Arbeitsformen: je kleiner die Klassenschülerzahl, umso individueller kann die Lernbetreuung sein. (Mayer 2003, S.13)

In der Studie von Kiss wird auch noch angesprochen, dass die LehrerInnen auch noch ein gewisses Basiswissen zum Umgang mit Computer und Internet brauchen. Dazu gehören:

- Wissen, wie und wo die Ergebnisse gesichert und gespeichert werden
- Grundkenntnisse der wichtigsten Programme, vor allem: Word, Excel, Powerpoint, Encarta, Bildbearbeitung und Internet-Browser.
- Möglichst Grundkenntnisse zur Benutzung weiterer Präsentationsprogramme und Webeditoren (Frontpage)
- Kenntnisse der im Klassenraum verwendeten Lern-, Übungs- und ggf. Simulationsprogramme.

Weiters wird empfohlen, diese Kenntnisse den Schülern nicht frontal aufzuzwingen, was auch der Grundidee des selbst gesteuerten Lernens widersprechen würde. Es wird als sinnvoller dargestellt, nach einer sehr kurzen Basiseinführung über das projektartige Bearbeiten inhaltlicher Aufgaben, die jeweils erforderlichen Kenntnisse gewissermaßen „on demand“ selbst beibringen. Dazu benötigt man im Unterricht die Hilfsmittel einer Online- Hilfe oder die Nachfragemöglichkeit bei Mitschülern bzw. des Unterrichtenden.

Verwendungsmöglichkeiten von Internet und PC im Unterricht

Die Möglichkeiten der Verwendung des Internets und des PC's haben fast keine Grenzen. In dem Skriptum von Kiss (2003, S.6f.) werden vier allgemeine Punkte genannt, die diese Möglichkeiten zumindest einmal in Kategorien ordnen:

1. Die *Recherche*: Die Schüler machen sich selbst schlau über top-aktuelle Informationen im Internet oder über (Multimedia-) Enzyklopädien wie Encarta. Genau wie im Umgang mit gedruckten Informationen gehört dazu auch die Qualitätsbeurteilung der verwendeten Quellen, aber natürlich auch Strategien, wie die Inhalte gesucht, sortiert, ausgewertet und zusammengefasst werden können.
2. Die *Dokumentation, Produktion* und *Präsentation* von Arbeitsergebnissen: Computer und das Internet bieten eine Fülle von Möglichkeiten Arbeitsergebnisse auszuwerten, zu dokumentieren und zu präsentieren. Dabei soll die Form der Dokumentation oder Präsentation dazu beitragen, den Inhalt besser, dauerhafter, anschaulicher und motivierender „rüberzubringen“ und nicht reiner Selbstzweck sein!
3. Zur *Kommunikation mit anderen*: Das Versenden von E-Mails, selbst das Chatten kann einfach nur witziger Zeitvertreib sein, in der Schule kann der schnelle Austausch von Informationen und Daten per E-Mail (und sogar per Chat) untereinander oder auch zwischen Lehrer und Schüler die Qualität der Arbeit nicht nur erleichtern, sondern auch verbessern. Dazu gehört insbesondere das Ablegen von Arbeitsergebnissen auf Servern, die allen Mitgliedern einer Arbeitsgruppe zugänglich sind.
4. *Üben und Wiederholen* (Training)/ *Simulationen* und *(interaktives) Experimentieren* mit spezieller (Lern)software. Diese Einsatzform ähnelt am meisten dem traditionellen Unterricht, vor allem deshalb, weil hier vor allem „didaktisierte“ Materialien zum Einsatz kommen. Es gibt mittlerweile einen großen Markt für derartige Lernsoftware, die auch zum spielerischen Üben und Wiederholen zu Hause verwendet werden kann. Die Qualität solcher Programme muss allerdings vor ihrem Einsatz durchleuchtet werden.

Welche Veränderungen können durch den Einsatz von PC und Internet im Unterricht entstehen?

Nach den angesprochenen Kategorien der Verwendungsmöglichkeiten kann man abschließend behandeln, wie sich der Unterricht durch das Lernen mit Computer und Internet verändern kann.

Auch hier wird wieder auszugsweise die Arbeit von Kiss (2002, S.2-4) angeführt, da darin nicht nur sehr viele wichtige Punkte angesprochen werden, sondern manche noch durch Aussagen seitens der Schüler verstärkt werden und man erkennen kann, dass ein Bezug zur Praxis hergestellt wurde:

- Das Lernen kann eigenverantwortlich, problemorientiert, selbst gesteuert und kooperativ erfolgen.
- Der Unterricht kann interessanter, lebendiger, spannender, mit mehr Spaß an der Freude ablaufen. Die SchülerInnen können selbst aktiv werden und sich dabei „in einem stressfreien Raum“ bewegen ohne ständige Kontrolle durch die Lehrkraft. Dadurch wird die Motivation erhöht. Die SchülerInnen empfinden den Lernerfolg größer, unter anderem durch die stark gesteigerte Motivation.

„Ich finde diese Art von Unterricht sehr gut, da er nicht so „trocken“ und eine schöne Abwechslung ist. Außerdem ist es gut, dass man sich alles selber suchen und erarbeiten muss, denn so kriegt man mehr mit.“

- Auch die Art der Wissensdarbietung kann motivierend auf die SchülerInnen wirken – sie agierten mit den Informationen und können diese „selbst in die Hand nehmen“ (entdeckendes Lernen).

„ Das Engagement ist deutlich höher als im „normalen“ Unterricht; ich will damit sagen: Im normalen Unterricht bekommt man alle Unterlagen vor die Nase gelegt, aber bei diesem Unterricht muss man sehr viel alleine finden →Material aus dem Internet, von den CDs beschaffen... “

- Durch die individuelle Benutzung des Notebooks/PCs kann die Kommunikationsfähigkeit verbessert werden, da sich die SchülerInnen mehr über die Arbeitsergebnisse austauschen können als im konventionellen Unterricht.
- Die SchülerInnen arbeiten häufiger mit anderen zusammen und können dabei wichtige Soft- Skills wie z.B. soziale Kompetenz und Selbstkompetenz erwerben.

- Durch den Umgang mit PC und Internet wird im handlungsorientierten Unterricht die Selbsttätigkeit der SchülerInnen gefordert und somit gefördert. SchülerInnen können so z.B. Strategien erarbeiten, sich aus der Fülle von Informationsmaterialien zu informieren. Bei der Beurteilung vorhandener Informationen ist ein Transfer von Wissen auf einem hohen Niveau erforderlich und Denken in komplexen Strukturen notwendig.

„Ich finde das war so viel besser → selbstständiges Arbeiten! Man hat wirklich die wichtigsten Infos finden müssen! War echt super!“

„Auf jeden Fall habe ich gelernt aus super maximalen Stoffangaben – super – minimale Angaben zu machen! Die wichtigsten Sachen herauszufiltern und Geduld zu haben! Fürs Internet braucht man nämlich viel Geduld und gute Nerven!“

- Medienkompetenz kann aufgebaut werden (grundlegendes Handling der Programme, Informationssuche, Informationsaufbereitung, -Be- und Verarbeitung, Informationsbeurteilung nach fachlichen... Kriterien,... Präsentation,...)
- Anspruchsvoller als die Informationssuche ist die Fähigkeit, die wesentlichen Informationen auszuwählen, zu vergleichen, zu gewichten, zu strukturieren und zu nutzen. Die SchülerInnen müssen dabei Strategien entwickeln, das Material überprüfen, aus Überschriften auf die Inhalte, aus Angaben über Findstellen oder von den Autoren auf Richtigkeit und Verwendbarkeit zu schließen. Dadurch können die SchülerInnen Handlungskompetenz trainieren.
- Bei der Materialbearbeitung kommen neue Strategien und Denkanforderungen zum Tragen. Texteingabe, Scannen von Bildern und Zusammenstellen von Informationen fordert ebenso wie das Denken in Ordnern, Verzeichnissen und Dateisystemen komplexe Fähigkeiten im Denken und Organisieren. Den SchülerInnen stehen viele Medien und Informationen zur Verfügung. Über den Lösungsweg entscheiden sie. Die Informationen müssen logisch abgelegt sein, so dass die SchülerInnen sie finden und auf sie zugreifen können.
- Den SchülerInnen fällt es leichter, Ordnung zu halten und den Überblick zu bewahren - Übersichtliche Heftführung durch Strukturieren über Ordnersystem...
- Durch Projektarbeit in der Gruppe kann der Unterricht differenziert erfolgen
- Die SchülerInnen können selbst als LehrerInnen agieren („peer teaching“)
- Die SchülerInnen recherchieren in echten und wirklichen Quellen – nicht in didaktisierten Materialien und in häufig viele Jahre alten Schulbüchern. Wichtig ist in diesem Zusammenhang aber zu bedenken, dass nicht schülergerecht

aufbereitetes Material oft nur für sehr wenige (sehr gute) Schüler verwendbar ist. SchülerInnen könnten eher dazu verfallen, Texte zu kopieren ohne sie zu verstehen und zu hinterfragen. Unterlagen, die von „Praktikern“ und Fachdidaktikern in gemeinsamer Arbeit erstellt wurden, erweisen sich als Material in diesem Zusammenhang als sehr brauchbar, da sie sowohl didaktische als auch praxisbezogene Aspekte berücksichtigen.

- Die SchülerInnen benutzen dieselben Werkzeuge wie im wirklichen Leben: Zum Forschen, Denken, Handeln.
- Positive Beeinflussung der Lernsituation, da die Kombination verschiedener Medien und die unterschiedlichen Aufbereitungsmöglichkeiten von Informationen alle Sinnesorgane ansprechen kann (z.B. visuell oder akustisch)
- Eine neue Art im Umgang mit Fehlern entsteht: Man löscht sie mit strg + z bzw. den „Rückgängigknopf“ drücken und versucht es noch einmal! Fehlerfreundlicher Unterricht führt zur Förderung der Kreativität!
- Das Lernen mit Notebooks erhöht das Selbstwertgefühl der Schülerinnen.
- Die Selbstreflexion und Selbstbewertung der Schüler verbessert sich.

Anhand dieser ausführlichen Liste und der Anzahl der in ihr angesprochenen Aspekte kann man sehen, wie viele Punkte beim Einsatz des Computers im Unterricht zu berücksichtigen sind. Allerdings kann man meiner Meinung nach die meisten der angesprochenen Punkte zumindest nach Tendenzen kategorisieren.

In der ersten Kategorie kann man die Punkte zusammenfassen, die sich mit der Veränderung der Lern- und Lehrkultur zusammenfassen lassen. Dabei kann man erkennen, dass durch den Einsatz des Computers eine Ausrichtung des Unterrichts in Richtung des handlungsorientierten Unterrichts und des eigenverantwortlichen Lernens stattfindet, wobei zu beachten ist, dass, wie oben angesprochen, ein Großteil der Materialien nur für einen Bruchteil der Schüler verständlich ist. Es wird dann ja auch empfohlen auf Materialien zurückzugreifen, die sowohl von Praktikern als auch von Fachdidaktikern erstellt wurden.

Die nächste Kategorie, die angesprochen werden soll, ist jene der Motivation. Es werden viele verschiedene Aspekte genannt, bei denen durch die Verwendung des PCs bzw. des

Mediums Internet die Motivation der SchülerInnen gesteigert wird. Meiner Meinung nach sind viele der genannten Aspekte durchaus nachvollziehbar, wenn der Unterricht dementsprechend gestaltet ist. Dass bei längerem Einsatz des Computers alleine die Motivation durch denselbigen gegeben ist, ist anzuzweifeln, wie man auch an der Aussage von Andrea Mayer erkennen kann:

Im Unterricht zeigt sich auch, dass die Motivation, die durch das Arbeiten am Computer selbst vorerst gegeben ist, mit der Zeit abnimmt, und zwar umso mehr, je länger die Schüler/-innen mit PCs im Regelunterricht arbeiten. Der Computer wird für die Schüler/-innen in weiterer Folge vielmehr zu einem Werkzeug und nicht mehr um seiner selbst benutzt, die Sachebene tritt in den Vordergrund.

(Mayer 2003; S.13)

Als dritte Kategorie ist sicherlich der Alltagsbezug und die gesteigerte Medienkompetenz bzw. die Fähigkeiten zur Anwendung der Möglichkeiten des PCs bzw. des Internets zu benennen. Viele der angesprochenen Punkte gehen in diese Richtung, und meiner Meinung nach wird es in Zukunft unumgänglich sein, die Schüler in der Schule mit jenen Arbeitsmöglichkeiten vertraut zu machen, die sie später in ihrem Berufsleben einmal brauchen werden. Dies wird auch schon im letzten zitierten Punkt deutlich, in dem angesprochen wird, dass die SchülerInnen Startvorteile bei den Bewerbungen zu Praktikumsplätzen haben.

Als vierte und letzte Kategorie kann man die soziale Kompetenz und die Teamfähigkeit der Schüler angeben. Diese Kompetenzen sind sicherlich wichtig und werden auch durch den projektartigen Unterricht beim Einsatz des Computers gefördert, doch möchte ich dies nicht alleine dem Einsatz des Computers zuschreiben. Denn meiner Meinung nach werden allgemein durch Projekte die sozialen Kompetenzen gefördert. Natürlich ist der Kommunikationsvorteil durch Vernetzung der Computer nicht wegzuleugnen, aber manche der anderen genannten Punkte, wie z.B. das „peer teaching“, können auch in Projekten ohne Computereinsatz realisiert werden. Dies soll allerdings keinesfalls als Kritik an der Studie angesehen werden, da alle genannten Punkte durch den Einsatz des Computers forciert werden.

3.2 Einsatz des Computers im Unterricht zur Quantenphysik

Nach der Betrachtung der Möglichkeiten und positiven Auswirkungen, die sich durch den Einsatz des Computers im Unterricht ergeben, stellt sich wohl nicht mehr die Frage, ob der Einsatz des PCs im Unterricht zur Quantenphysik sinnvoll sei. Allerdings gibt es neben den in 3.1 genannten Punkten noch spezifischere Argumente, um für den Einsatz von Simulationen zu plädieren.

Die spezielle Problematik, die sich im Schulunterricht zur Quantenphysik ergibt, wird sehr schön in einer Aussage von Küblbeck und Müller in ihrem Buch „Die Wesenszüge der Quantenphysik“ dargestellt:

Leider befinden wir uns, was Experimente mit einzelnen Quanten angeht, in der Schule in einer Situation, die zunächst sehr unbefriedigend erscheint: Spaltexperimente mit einzelnen Quantenobjekten sind für den Unterricht momentan noch zu teuer. Die direkte Ortsmessung von Quantenobjekten am Spalt ist zwar ein beliebtes Gedankenexperiment, aber experimentell zu aufwändig für die Schule.

(Küblbeck/ Müller 2003, S.145)

Anhand dieser Aussage kann man erkennen, dass die experimentellen Möglichkeiten im Unterricht zur Quantenphysik sehr beschränkt sind. In den meisten Fällen kann man experimentell den Fotoeffekt und den Doppelspaltversuch mit einem Laser vorführen. Nur mit diesen zwei Versuchen wird man nicht sehr viele Aussagen der Quantenphysik bearbeiten können. Dadurch drängt sich gerade in diesem Gebiet der Schulphysik der Einsatz von multimedialem Material auf, wie auch von den oben Genannten betont wird:

Unverzichtbar für den Quantenphysik-Unterricht erscheinen uns Computer-Simulationen von Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten, die eine übersichtliche und leicht zu steuernde Visualisierung der experimentellen Ergebnisse ermöglichen. Bewährte Vertreter sind die Doppelspalt- und die Interferometer-Simulationen vom Münchner Physikdidaktik-Lehrstuhl...

(Küblbeck/ Müller 2003, S.145)

Die in dem Zitat erwähnten Simulationen werden auch kurz in Kapitel 3.3 behandelt, ihr Einsatz im Unterricht ist sicherlich sinnvoll, wie auch folgend dargestellt wird.

Nach der Darstellung der Argumente, die für eine Verwendung von Simulationen im Quantenphysik-Unterricht sprechen, werden nun noch einige Punkte aufgezählt, welche durch den Einsatz der Programme abgedeckt werden können.

Dazu gehören sicherlich jene, die von Küblbeck und Müller (2003, S.145) aufgezählt werden: Die Programme erlauben

- die Darstellung der klassischen Interferenzmuster
- die Beobachtung, wie sich das Interferenzmuster aus Einzelereignissen bildet und
- die Blockade der einzelnen Wege.

Schon an diesen drei Merkmalen kann man erkennen, dass die Simulation dem Doppelspaltversuch schon überlegen ist, da mit einem Laser nicht dargestellt werden kann, wie sich das Interferenzmuster aus Einzelereignissen bildet. Auch die Blockade eines einzelnen Wegs ist meistens mit den experimentellen Möglichkeiten an der jeweiligen Schule nicht möglich und außerdem ist die Anschaulichkeit nicht unbedingt gegeben.

Darüber hinaus werden noch weitere Möglichkeiten der Doppelspaltsimulation aufgelistet:

- Die Sorte der Quantenobjekte kann eingestellt werden (Elektronen, Photonen, Neutronen, Atome, klassische Kugeln, usw.)
- An den Quantenobjekten kann zum Teil eine Ortsmessung am Spalt durchgeführt werden
- Momentaufnahmen können gespeichert und verglichen werden und
- Verteilungen können überlagert werden

Ein meiner Meinung nach sehr wichtiger Punkt ist, dass man das „quantenartige“ Verhalten mehrerer verschiedener Teilchenarten untersuchen kann und damit gleich erkennt, dass die zuvor behandelten Konzepte genauso gut für Elektronen wie für Photonen und Atome gilt. Außerdem besteht die Möglichkeit, durch klassische Kugeln (Gewehr-kugeln) auch jenes Verhalten darzustellen, das man sich klassisch vorgestellt hätte. Damit kann dazu beigetragen werden, zu verhindern, dass die Schüler das Verhalten

der Quantenobjekte als ganz normal hinnehmen und nicht hinterfragen, warum es Unterschiede zwischen klassischen Teilchen und Quantenobjekten gibt.

Die anderen angesprochenen Punkte zeigen auch einige Vorzüge der Simulationen auf. Durch die Speicherung der Momentaufnahmen können Vergleiche angestellt werden, in welchen Eigenschaften sich die Aufnahmen gleichen und wo sie sich unterscheiden. Dies kann dann in Relation mit den verschiedenen Parametereinstellungen gebracht werden. Bei den Parametereinstellungen ergibt sich auch durch den Einsatz der Simulation, dass jeder Schüler die Möglichkeit hat, ein bisschen etwas auszuprobieren und damit ist sicherlich ein gewisser Reiz vorhanden, sich intensiv damit zu beschäftigen. Außerdem kann man durch die Ortsmessung auch den Wesenszug der „Welcher- Weg-Information“ durch die Schüler in einer Computersimulation behandeln lassen.

Auch bei der Interferometer-Simulation kann man einige interessante Erweiterungen des ursprünglichen Versuchsaufbaus vornehmen, wie etwa:

- die einzelnen Wege mit Polarisationsfolien versehen und
- auf den einzelnen Wegen Detektoren aufstellen, mit denen statistische Untersuchungen für die zwei Wege gemacht werden können.

Mit all diesen Möglichkeiten der Simulationen lassen sich alle vier Wesenszüge, die im Modell von Küblbeck und Müller für die Quantenphysik als charakteristisch dargestellt werden (siehe Kapitel 1), sehr schön und relativ einfach für den Schüler verdeutlichen. Außerdem wird es als weiterer Vorteil seitens der Autoren gesehen, dass die Tatsache, dass es Simulationen für zwei ähnliche, aber doch verschiedene Experimente gibt, Transferaufgaben erlaubt: Wenn Inhalte an einem Experiment im lehrerzentrierten Unterricht erarbeitet wurden, können sie von den Schülern auf das andere Experiment angewandt werden.

Ebenfalls wird von den Autoren angesprochen, wie man Vertrauen in die von der Simulation produzierten Daten, schaffen kann, wenn seitens skeptischer Schüler der Einwand kommt, dass jede Simulation nur das zeigt, was vorher einprogrammiert wurde:

1. Man kann veröffentlichte Ergebnisse präsentieren (z.B. von Internetseiten der Universitäten).
2. Man kann Filme von Originalexperimenten zeigen.
3. Man kann klassische Versuche vorführen, deren Intensitätsverteilungen den Verlauf der $P(x)$ - Funktionen zeigen.

Mit diesen Hilfsmitteln zur Akzeptanz der Computersimulationen erreicht man laut der Autoren einen akzeptablen Ausweg aus dem eingangs beschriebenen Dilemma durch die Kombination von Originaldaten, Film, Simulation und klassischem Experiment.

Nachdem im ersten Unterkapitel 3.1 allgemeine Gründe für den Einsatz des Computers im Physikunterricht aufgelistet wurden und in 3.2 mehrere Gründe zum Einsatz des Computers bzw. von Simulationen im Quantenphysikunterricht angegeben wurden, sollen im nächsten Unterkapitel einige dieser Simulationen vorgestellt werden, deren Einsatz, wie oben dargestellt, seitens der Fachdidaktik gefordert wird.

3.3 Vorstellung von Simulationen zur Quantenphysik

Wie schon am Anfang des Kapitels erwähnt, wird das Hauptaugenmerk auf das Projekt Visual Quantum Mechanics von der Physics Education Group auf der Kansas State University gelegt. Dazu werden auch die im vorherigen Abschnitt erwähnten Simulationen der Münchner Physikdidaktikgruppe vorgestellt, die einige schöne Möglichkeiten bieten, um das Konzept der Wesenszüge von Küblbeck und Müller (siehe Kapitel 1) zu verdeutlichen. Abschließend wird noch eine Simulation von Franz Embacher vorgestellt, die den Bombentest von Elitzur und Vaidmann schülergerecht darzustellen versucht.

Visual Quantum Mechanics

Was bei dem ersten Betrachten der Internetseite (<http://phys.educ.ksu.edu/vqm/index.html>) auffällt, ist das reichhaltige Angebot der Simulationen. Es gibt insgesamt 25 interaktive Computerprogramme, die alle kostenlos online zur Verfügung stehen. Die angebotenen Programme benötigen alle den Shockwave-Player, der aber kostenlos zum Download bereit steht. Bei der Vorstellung der Simulationen werde ich mich auf fünf der angebotenen Simulationen beschränken, die meiner Meinung nach gut in den Unterricht zur Quantenphysik eingefügt werden können. Da die Angaben zu den Simulationen alle in englischer Sprache verfasst sind, sollte keine Probleme im Unterricht bringen.

Absorptionsspektren

Bei dieser Simulation geht es um eine Veranschaulichung der Absorptionsspektren und deren Erklärung. Wenn man die Simulation startet, braucht man sich nur an die vorgeschlagene Vorgangsweise halten, um die Simulation richtig zu beherrschen. Wenn man nun eine der Gaslampen in die Fassung einsetzt (einfach mit der Maus hinziehen), erscheint das Absorptionsspektrum.

Nun kann man das Absorptionsspektrum „nachbauen“, indem man die verschiedenen Energiestufen in dem nebenstehenden Diagramm einfügt und die Energiedifferenzen, wie in der Anleitung beschrieben, zwischen den einzelnen Stufen beliebig variiert. Man kann

dies so lange fortführen, bis man ein Spektrum erzeugt hat, das jenem des eingesetzten Gases, welches oberhalb zum Vergleich angeführt ist, entspricht. Nach diesem Vorgehen sieht das Ganze in etwa so aus:

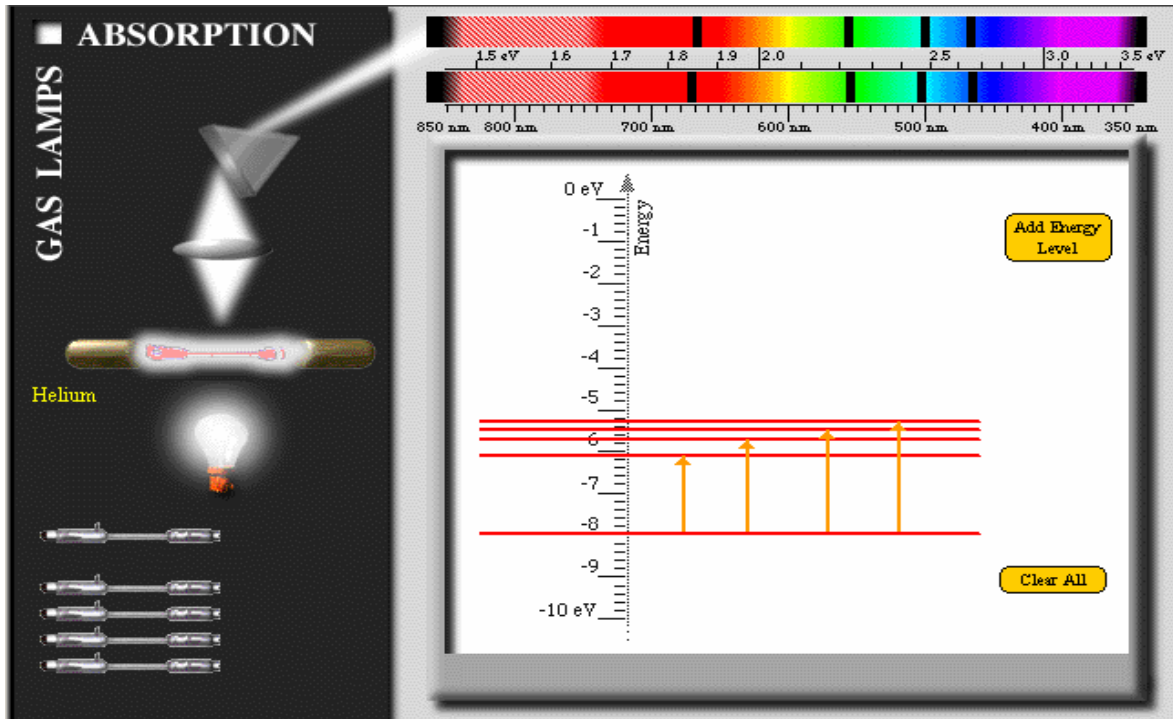


Abb.1: Simulation zu den Absorptionsspektren

Nachdem das prinzipielle Vorgehen innerhalb der Simulation abgehandelt wurde, soll noch kurz eine Bewertung erfolgen. Meiner Meinung nach ist diese Simulation sehr gut gelungen und auch für Schüler relativ leicht zu bedienen. Weiters sind durch die Wahlmöglichkeit verschiedener Gase Freiräume für verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten im Unterricht gegeben. Da dies ein sehr spielerischer Zugang zu dem Thema der Spektren ist, besteht die Möglichkeit, dass die Schüler unterschiedlich schnell bei der Erarbeitung der Aufträge, die in der Simulation angeführt sind, weiterkommen. Wenn man mehrere Gase zur Verfügung hat, können die schnelleren Schüler einfach noch ein Spektrum „nachbauen“ und es entstehen somit keine Leerläufe.

Man kann diese Simulation auch zur Erklärung der Fraunhoferschen Linien verwenden. Wichtig ist es, im Unterricht darzustellen, dass die Absorptionslinien eine Eigenschaft des jeweiligen verwendeten Elements sind. Als Übergang zur nächsten Simulation erscheint ein Zitat aus dem Schulbuch von Sexl als sehr gut geeignet:

Die Absorptionslinien eines bestimmten Elements weisen auf dieselben Frequenzen hin wie die Emissionslinien, die das Element aussendet, wenn man es zum Beispiel erhitzt.

(Sexl 1990, S.188)

Wie man an dieser Aussage erkennen kann, sollten beide dieser, für die einzelnen Elemente sehr charakteristischen Eigenschaften, im Unterricht behandelt werden. Daher bietet sich als nächster Punkt der Simulationen die Behandlung der Emissionsspektren an.

Emissionsspektren

In dieser Simulation werden die Emissionsspektren von Gasen behandelt. Die Vorgangsweise bei diesen ähnelt der Simulation zu den Absorptionsspektren. Wiederum beginnt man damit, eine Gassorte zu wählen, die man in die Fassung per Mausbewegung einsetzt. Mittels einer Linse und eines Prismas werden die Spektralfarben untersucht, und es erscheinen in der oberen Anzeige die emittierten Linien des jeweiligen Elements.

Mittels der einzufügenden Energiestufen und den Übergängen zwischen diesen kann man wieder das für das Element charakteristische Spektrum „nachbauen“. Wenn man im Unterricht schon die eine Simulation verwendet hat, ist die Arbeitsweise bei der anderen den Schülern sicherlich klar, da sie sich kaum voneinander unterscheidet. Wenn man alle Arbeitsschritte durchführt, kommt es wieder zu einer Übereinstimmung zwischen dem realen Spektrum und dem selbst erstellten „Nachbau“. Bei dem angeführten Beispiel handelt es sich um das Element Quecksilber(Mercury) (siehe Abb.2).

Nach der Erklärung der Simulation kann man auf die Möglichkeiten eingehen, die diese im Unterrichtseinsatz bietet. Meiner Meinung nach sollte den Schülern auf jeden Fall dargelegt werden, dass zwar die Bearbeitung der Simulationen fast identisch ist, doch unterschiedliche Phänomene behandelt werden, die aber auf die gleiche Eigenschaft der einzelnen Elemente hinweisen. Die Vorteile der verschiedenen Gassorten, die zur Verwendung bereit stehen, sind schon bei der Simulation zu den Absorptionsspektren behandelt worden und brauchen somit nicht noch mal aufgezählt werden.

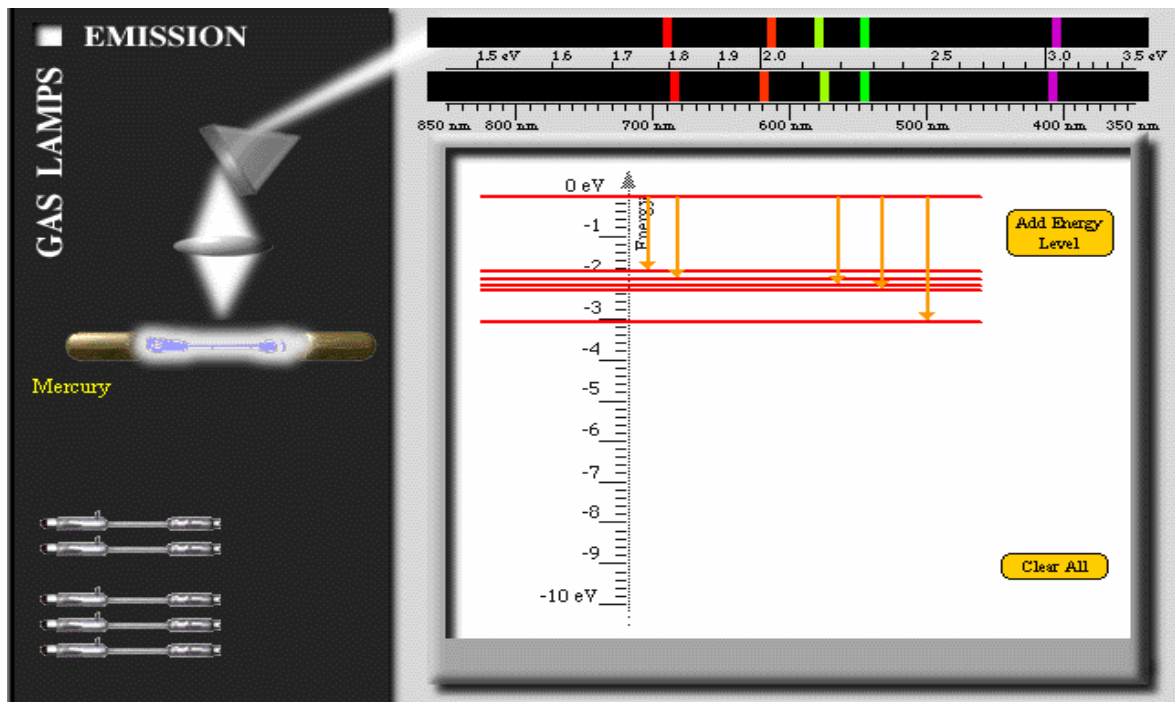


Abb.2: Simulation zu den Emissionsspektren

Zu beiden Simulationen ist noch anzumerken, dass sie beide bei der Erarbeitung eines Atom-Modells behilflich sein können. Innerhalb der Besprechung dieser Simulationen sollte allenfalls geklärt werden, dass die Farbe des Lichts von der Wellenlänge bzw. der Frequenz abhängt. Man kann mit diesen Simulationen natürlich die Spektren von verschiedenen Lichtquellen im Unterricht behandeln.

Als eine weitere Einsatzmöglichkeit der Eigenschaften von Spektrallinien, wie von Kühnelt und Pitzl (2004, S6f.) in einer Rohfassung vorgeschlagen, kann man den Schülern aufzeigen, dass durch Zuführung von Energie ein verdünntes Gas Licht mit charakteristischen Wellenlängen emittiert. Mit der Feststellung, dass verschiedene Gase verschiedene Spektren haben, kann man als weiteren Schritt angeben, dass die Energieportionen im Licht den Differenzen zwischen den Energiestufen im Atom entsprechen. Dies ist eine sehr schöne Darstellungsmöglichkeit, die schon in der sechsten Klasse besprochenen Spektren nochmals zu behandeln und mit den Energiestufen im Atom im Sinne eines vernetzenden Unterrichts zu verbinden. Damit wird auch etwas deutlicher, warum der Einsatz der beiden Simulationen im Unterricht zur Quantenphysik als durchaus berechtigt scheint, obwohl die Behandlung der Spektren eigentlich schon früher erfolgt.

Franck Hertz Experiment

Das Franck Hertz Experiment ist ein weiterer Beleg für die Existenz von Energiestufen in den Atomen. Die Simulation des Franck Hertz Experiments ist zwar sehr einfach zu bedienen, hat jedoch als Einzige keine Bedienungsanleitung. Deshalb ist bei dieser eine Anleitung durch die Lehrperson unumgänglich. Eine kurze Erklärung und Arbeitsanweisung für Schüler kann man im Anhang B finden.

Wenn man die Simulation in Abbildung 3 betrachtet, kann man die wesentlichen Punkte, die zur Bedienung des Programms genügen, gleich erfassen.

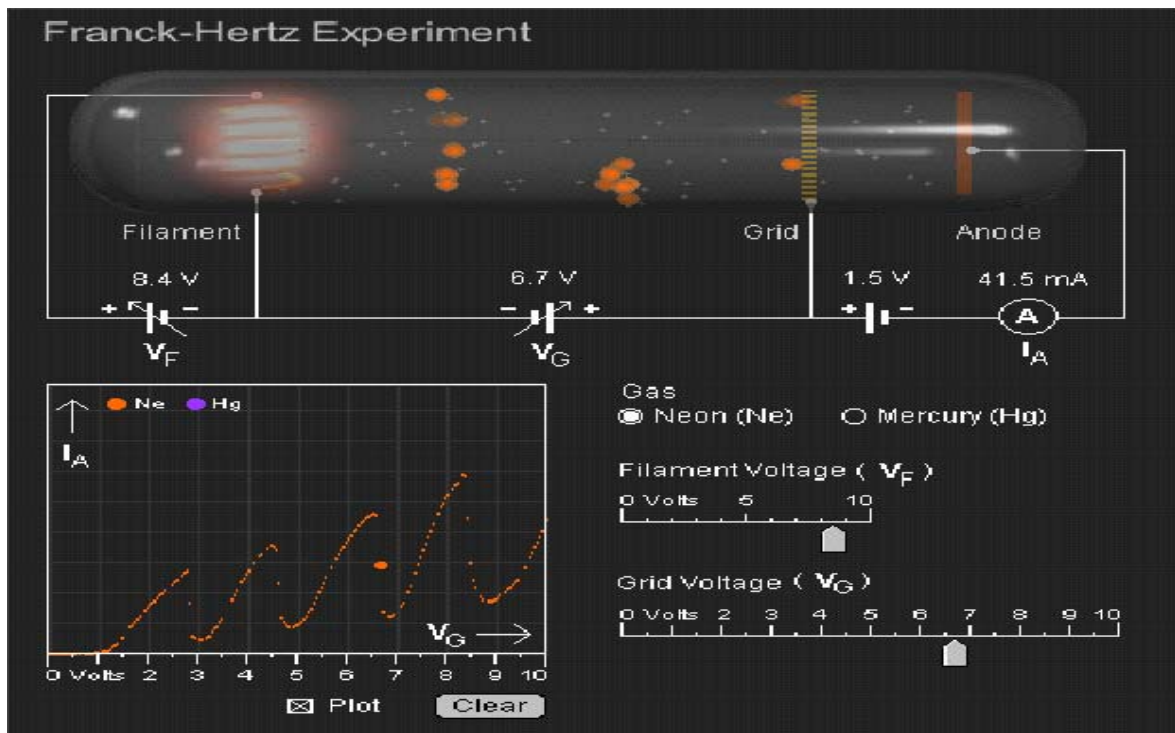


Abb.3: Simulation zum Franck Hertz Versuch

Die Möglichkeiten der Steuerung durch den Benutzer sind die folgenden:

- Es kann die Art des zu betrachtenden Gases ausgewählt werden. Es stehen Neon und Quecksilber zur Auswahl.
- Man variieren kann die Spannung des Glühdrahts (Filament Voltage) variieren. Damit kann man die Anzahl der emittierten Elektronen regeln.
- Mit der Gitterspannung (Grid Voltage) kann man die Energie der beschleunigten Elektronen regeln.

Wenn man nun die Gitterspannung variiert, erhält man im Strom-Spannungs Diagramm die in der Abbildung schon eingezeichnete Kurve. Anhand des Verlaufs kann man erkennen, dass man bei bestimmten Energiewerten einen abrupten Abfall der Stromstärke beobachten kann. Wie kann man sich das erklären?

Man kann das folgendermaßen interpretieren: Offensichtlich können Hg Atome eine Energie von genau 4,9 eV aufnehmen. Sie gehen dabei aus dem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand über. In den Grundzustand kommen sie wieder durch Abgabe elektromagnetischer Strahlung. Wenn nun die Energie erhöht wird, dann kann dieser Vorgang ab der doppelten Energie (also: 9,8 eV) zweimal ablaufen.

Was kann man bei dem Arbeiten mit der Simulation noch erkennen? Wenn man die beiden verschiedenen Gassorten betrachtet, kann man erkennen, dass die Energie, die aufgenommen werden kann, unterschiedlich ist. Außerdem kann man sehen, dass die charakteristischen Zacken in der Kurve beim gleichen Energiewert bleiben, wenn man die Glühdrahtspannung variiert. Das einzige, was sich logischerweise ändert, ist der Absolutwert der gemessenen Stromstärke.

Welche Inhalte können nun durch diese Simulation vermittelt werden? In dem Schulbuch von Sexl wird nach der Erklärung des Franck Hertz Versuchs folgender Satz als Aussage aus dem Versuch formuliert:

Inelastische Streuung erlaubt die Untersuchung der Energiestufen eines Objekts.

Atome besitzen diskrete Energiestufen.

(Sexl 1992, S.66)

In dem Schulbuch wird zum Franck Hertz Versuch passend, eine Anwendung der Quantenphysik im Alltag besprochen: Der Leuchtstoff in der Leuchtstofflampe, die durch UV-Strahlung erregt wird, wird durch Stöße von Elektronen mit Hg-Atomen angeregt.

Insgesamt kann man sagen, dass mit Arbeitsaufträgen ausgestattete Schüler keine Probleme bei der Beschäftigung mit dieser Simulation haben sollten.

Tunneleffekt

Die Simulation zum Tunneleffekt ist ebenfalls relativ leicht zu bedienen, allerdings ist die Beschreibung der Simulation etwas lange geraten. Man ist schon gut und gerne bis zu zehn Minuten damit beschäftigt, die Beschreibung der Einstellungsmöglichkeiten der Barriere und der Teilchen zu lesen. Wie sich in der noch später zu behandelnden Erprobung im Unterricht gezeigt hat, stellt die Einstellung der Parameter gar keine Schwierigkeit für die Schüler dar.

Man sollte den Schülern beim Einsatz im Unterricht auf jeden Fall eine separate Arbeitsanweisung geben, denn bis sie sich mit allen Einstellungsmöglichkeiten vertraut gemacht haben, vergeht sicherlich viel Zeit. Außerdem gab es bei der Arbeitsanweisung auf der Internetseite einen Arbeitsschritt, den man bei der Online-Version gar nicht durchführen konnte, was aber mittlerweile behoben worden ist.

Wenn man die Abbildung 4 betrachtet, sieht man, dass alle Parametereinstellungen auf der rechten Seite aufgelistet sind.

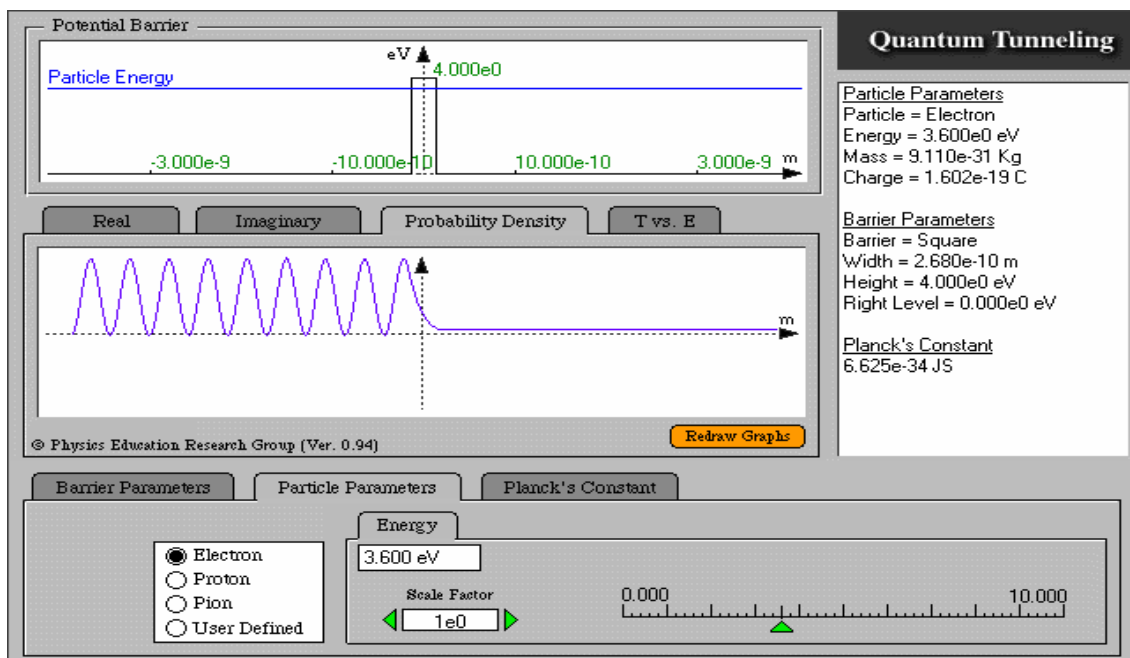


Abb.4: Simulation zum Tunneleffekt

Wie man an der Abbildung erkennen kann, bietet diese Simulation eine ganze Menge an Variationsmöglichkeiten. Es besteht die Möglichkeit, zwischen Elektronen, Protonen oder

Pionen zu wählen. Außerdem kann man die Energie der gerade genannten Teilchen einstellen. Die Verstellmöglichkeiten bei der Barriere sind bei weitem noch größer: Es kann die Form, die Höhe, die Weite und die Möglichkeit einer Doppelbarriere eingestellt werden.

Ein Punkt, den ich persönlich sehr interessant und für Schüler auch möglicherweise aufschlussreich finde, ist die Möglichkeit, den Wert der Planckschen Konstante zu verändern. Damit kann man erkennen, welche Auswirkungen es hätte, wenn z.B. die Plancksche Konstante bei weitem größer wäre. (Man kann die Konstante zumindest bis zu einem Wert steigern, der dem 10^{10} Wert entspricht). Man kann dabei aber auch die Werte der Barrieren den neuen Größenordnungen anpassen.

Die Gebiete, die durch die Simulation abgedeckt werden, sind einerseits natürlich der Tunneleffekt und dessen Anwendungen, wie z.B. das Raster- Tunnel Mikroskop, aber auch der Wahrscheinlichkeitsaspekt der Quantenphysik kann sehr schön mit dieser Simulation verdeutlicht werden. Es kann sogar der reelle und komplexe Anteil separiert dargestellt werden, sowie die Wahrscheinlichkeitsdichte.

Doppelspaltversuch

Das Verständnis der quantenphysikalischen Interpretation des Doppelspaltversuchs mit Elektronen wird seitens der Fachdidaktik als enorm wichtig betrachtet. In den im ersten Kapitel vorgestellten Konzepten wird die Wichtigkeit dieses Versuchs ganz klar hervorgehoben. In der Berliner Konzeption dient ein Film über den Doppelspaltversuch mit Elektronen sogar als Einstieg in den Unterricht zur Quantenphysik, und auch bei dem Konzept der vier Wesenszüge von Küblbeck und Müller wird der Versuchsaufbau des Öfteren zu Erklärungen herangezogen.

Mit den jetzt vorgestellten Simulationen des Doppelspaltversuchs (eine von der Kansas University, eine von der Münchner Physikdidaktikgruppe) kann man den Schülern nicht nur einen Film darüber zeigen, der nach wie vor die wichtige Rolle hat, Vertrauen in die Richtigkeit der Simulationen zu erzeugen (siehe Kapitel 3.2), sondern ihnen auch die Möglichkeit bieten, sich selbst aktiv mit dem Versuch vertraut zu machen.

Die Simulation des Doppelspaltversuchs auf der VQM.- Seite ist wiederum sehr leicht zu bedienen. Auch die Darstellung des Aufbaus ist sehr gut gelungen. Bei der Simulation kann man die Art von Teilchen auswählen, mit der man den Versuch durchführen möchte. Außerdem ist sowohl die Spaltbreite als auch die Energie der einzelnen Teilchen durch den Benutzer regelbar. Die letzte Variationsmöglichkeit bietet die Rate an Teilchen, die pro Sekunde durch die Versuchsanordnung geschickt werden.

Wenn man nun die ganzen Parameter eingestellt hat, zeichnet sich am Schirm aus den einzelnen Auftreffpunkten das Interferenzmuster ab. Um eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den verschiedenen erzielten Ergebnissen zu haben, besteht die Möglichkeit, vier der vorherigen Ergebnisse am rechten Rand abzulegen.

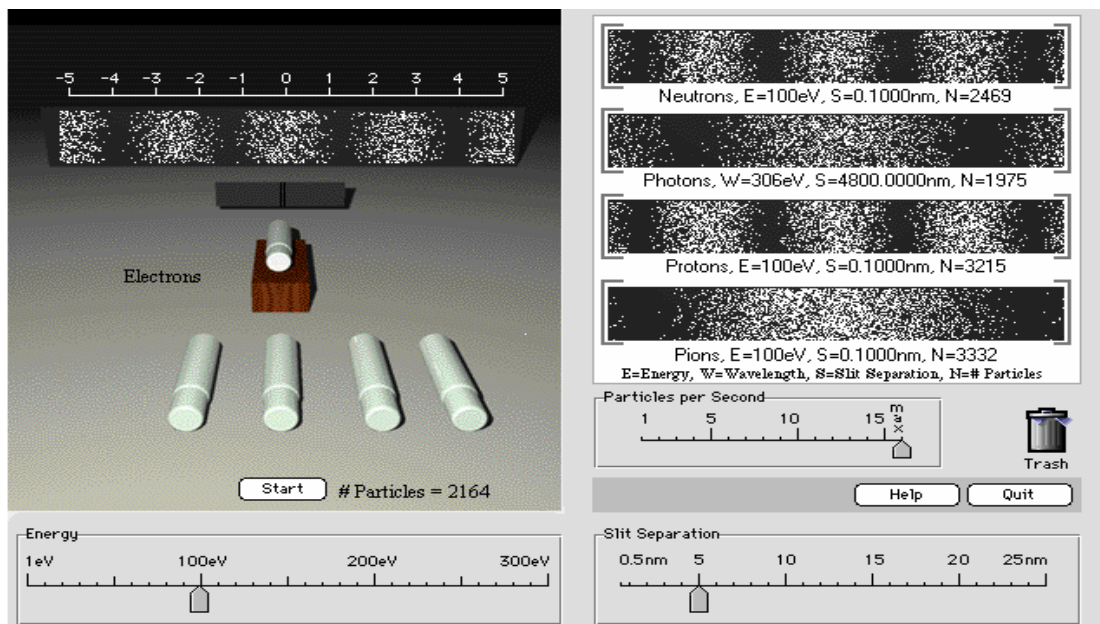


Abb.5: Simulation zum Doppelspaltversuch

Meiner Meinung nach können mit Hilfe dieser Simulation mehrere Aspekte der Quantenphysik behandelt werden. Als erster Punkt ist positiv hervorzuheben, dass der Versuch mit mehreren Teilchenarten durchgeführt werden kann. Damit kann man, im Sinne der Berliner Konzeption (Kapitel 1), davon abgehen, den Doppelspaltversuch nur mit Photonen zu demonstrieren.

An der Möglichkeit der verschiedenen Teilchenarten sei ein kleiner Kritikpunkt erlaubt. Wenn man eine andere Teilchenart wählt, dann verstellen sich automatisch der zu regelnde Energiebereich und die Spaltbreite. Dies ist sicherlich im Sinne einer schnellen Handhabe gerechtfertigt, allerdings sollte man im Unterricht die Schüler schon darauf hinweisen, welche Unterschiede hier zwischen den einzelnen Teilchenarten auftreten. Auch der Begriff der Einheit des Elektronenvolts sollte schon vorher im Unterricht vorgekommen sein, um Missverständnisse zu vermeiden.

Dass diese automatische Energieskalen- und Spaltbreitenanpassung direkte Konsequenzen aus der de Broglie Beziehung sind, sollte meiner Meinung nach im Unterricht unbedingt erwähnt werden. Die Auswirkungen der Energie der verwendeten Teilchen auf die Versuchsanordnung erkennt man an einer Aussage im Buch von Küblbeck und Müller:

... Die Elektronenoptik erforderte, die Elektronen auf eine Energie von 50 keV zu beschleunigen, was zur Folge hatte, dass die De Broglie- Wellenlänge von etwa 0,05 Å wesentlich kleiner als die Spaltdimensionen war. Jönsson musste also mit einem Interferenzmuster rechnen, bei dem Maxima und Minima sehr eng nebeneinander lagen.

(Küblbeck/ Müller 2003, S.111)

Eine sehr interessante Möglichkeit, um den Wesenszug der stochastischen Vorhersagbarkeit darzustellen, bietet die Verstellbarkeit der Rate der Teilchen, die pro Sekunde durch den Aufbau geschickt werden. Wenn man die Rate nach unten drosselt – möglich bis zu einem Teilchen pro Sekunde – kann man ganz klar zwei Dinge erkennen:

- 1.) Der Ort, an dem ein einzelnes Teilchen nachgewiesen wird, ist nicht vorhersagbar.
- 2.) Dennoch erscheint nach vielen Teilchen ein regelmäßiges Muster, wie man es vom Demonstrationsexperiment her kennt.

Die Simulation von der Kansas University hat - aus den oben genannten Gründen- sehr viele Einsatzmöglichkeiten. Allerdings ist es nicht sehr leicht möglich, diesen Versuch durchzuführen, wenn man keine direkte Internetverbindung zur Verfügung hat. Bei den anderen bis jetzt vorgestellten Programmen war dies immer möglich, aber bei dieser Simulation würde man ein kostenpflichtiges Programm benötigen. Deswegen wird noch eine Version von der Münchner Physikdidaktikgruppe vorgestellt, die ungefähr die

gleichen Möglichkeiten bietet, aber auch offline bearbeitet werden kann und kostenlos zum Download zur Verfügung steht. (siehe Literaturverzeichnis, Autor Klaus Muthsam)

Bei dieser Doppelspaltversuchssimulation ist der optische Eindruck des Aufbaus ein etwas anderer, aber dadurch keineswegs ein schlechterer:

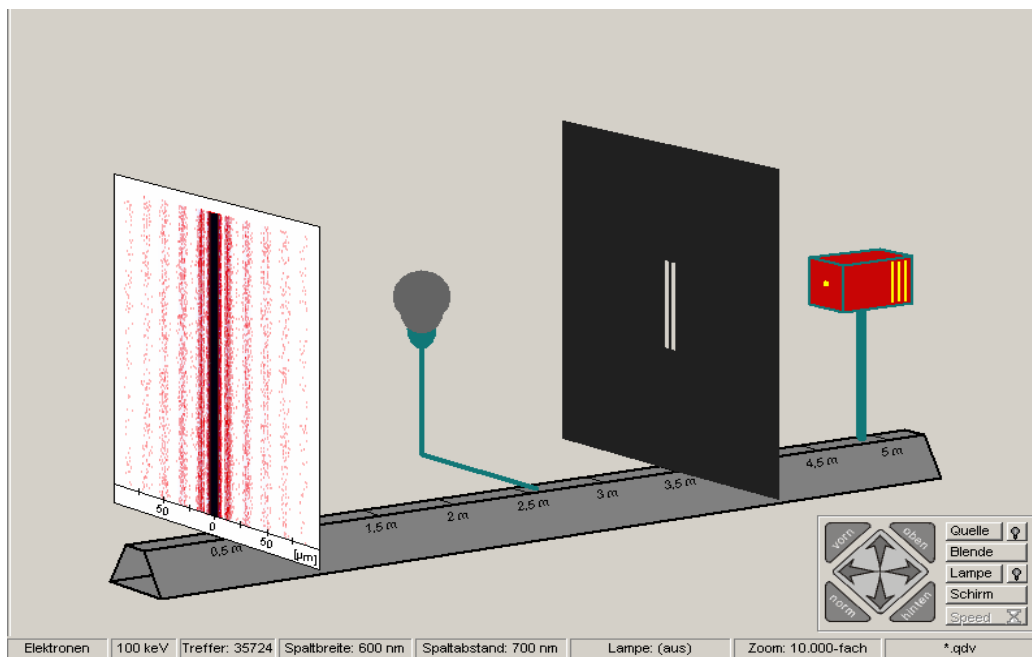


Abb. 6: Münchner Simulation zum Doppelspaltversuch

Wenn man das Menü rechts unten betrachtet, kann man unter dem Punkt „Quelle“ wiederum die Teilchenart auswählen, die man benutzen möchte und deren Energie einstellen. Dabei wird auch die zugehörige De Broglie Wellenlänge gleich mit angezeigt. Ein weiterer Punkt, der im Unterricht zu verwenden ist, ist die Möglichkeit, Gewehrkugeln als klassische Teilchen zu wählen und damit demonstrieren zu können, wie sich klassische Teilchen verhalten.

Auch bei der Spalteinstellung gibt es mehrere Variationsmöglichkeiten: Man kann sowohl den Spaltabstand als auch die Spaltbreite regeln. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit einen der zwei Spalte zu verschließen. Somit kann man zeigen, dass die Verteilung nicht einfach die Addition der beiden Spaltergebnisse ist.

Bei der Auswertung am Schirm kann man die theoretisch erwartete Verteilung einzeichnen lassen. Weiters kann man noch, indem man den Speed- Button gedrückt hält, die Anzahl

der aufgetroffenen Teilchen schlagartig erhöhen und somit schneller zum Interferenzmuster kommen. Als letzte Steuerungsmöglichkeit ist noch anzuführen, dass die Ansicht aus allen Perspektiven erfolgen kann.

Wenn man das Programm downloadet, bekommt man einen Lehrgang dazu, der alle Funktionen dieser Simulation erklärt und diese auch für Schüler verständlich darstellt. Allerdings ist dieser etwas langwierig, und die meisten Schüler werden sich nach einer kurzen Anleitung auch ohne ihn zurechtfinden.

Bei beiden Simulationen gibt es mehrere Möglichkeiten des Einsatzes. Welche einem besser erscheint, ist Geschmackssache und auch nach der Frage auszurichten, was man genau damit behandeln möchte. Meiner Meinung nach bietet die Münchner Simulation beinahe etwas mehr Möglichkeiten, wie z.B. die Verschließbarkeit der einzelnen Spalten oder das Verwenden von klassischen Teilchen.

Mach Zehnder Interferometer

Die Simulation zum Mach Zehnder Interferometer wurde von Albert Huber, ebenfalls von der Münchner Physikdidaktikgruppe, erstellt. Auch diese Simulation ist kostenlos zum Download freigegeben und offline problemlos bedienbar.

Die Simulation bietet einen Aufbau des Interferometers, aber auch die Möglichkeit, in jeden Strahlengang einen Detektor einzufügen. Außerdem besteht die Möglichkeit, in jedem Strahlengang einen Polarisationsfilter aufzustellen, dessen Polarisationsrichtung man frei wählen kann und dessen Auswirkungen auf das erzeugte Interferenzmuster direkt zu beobachten sind. Als letzte Möglichkeit, das Interferenzmuster zu verändern, kann man nach dem letzten Strahlteiler einen weiteren Polarisationsfilter einbauen.

Die weiteren Einstellmöglichkeiten bestehen darin, aus welcher Perspektive man das Mach Zehnder Interferometer betrachten will, ob man einzelne Photonen oder einen Laser als Quelle verwendet. Bei den einzelnen Photonen gibt es, wie beim Doppelspaltversuch zuvor, eine Tempotaste, mit der die Anzahl der durch das Interferometer geschickten

Photonen, sehr schnell ansteigt. Wie der prinzipielle Aufbau aussieht, zeigt die folgende Abbildung, die einen „Quantenradierer“ nachstellt:

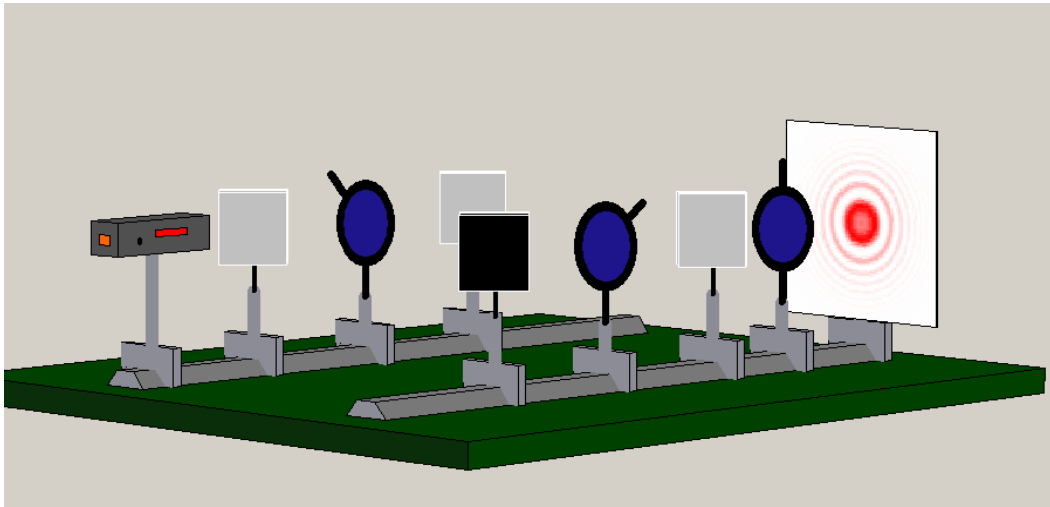


Abb.7: Simulation zum Mach Zehnder Interferometer

Auch hier kann man einige schöne Anwendungen betreiben. Wenn man nur den Aufbau des Interferometers verwendet, kann man es als Darstellung eines „Zwei Wege Experiments“ benutzen. Mit den in den Strahlengang einbaubaren Detektoren kann man verdeutlichen, dass bei einer Möglichkeit der Wegunterscheidung das Interferenzmuster verschwindet. Dies kann man auch mit den Polarisatoren bewerkstelligen- einer auf $+45^\circ$, der andere -45° . Mittels eines dritten kann man diese Unterscheidungsmöglichkeit wieder „ausradieren“, wie man auch an der Abbildung erkennen kann.

Meiner Meinung nach bietet diese Simulation sehr viele Möglichkeiten der Verwendung, vor allem wenn man sich im Unterricht an dem Konzept der „Vier Wesenszüge“ von Küblbeck und Müller orientieren möchte.

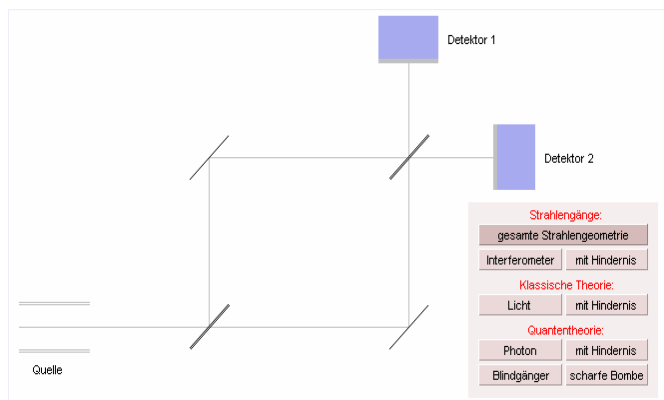
Bombentest von Elitzur und Vaidmann

Eine weitere Anwendung des Mach Zehnder Interferometers ist der Bombentest von Elitzur und Vaidmann, der in einer Simulation von Franz Embacher dargestellt wird. Durch den Bombentest besteht- wie auch in einem Artikel im Spektrum der Wissenschaft

(Kwiat, 2003) nachzulesen ist- die Möglichkeit einer wechselwirkungsfreien Quantenmessung.

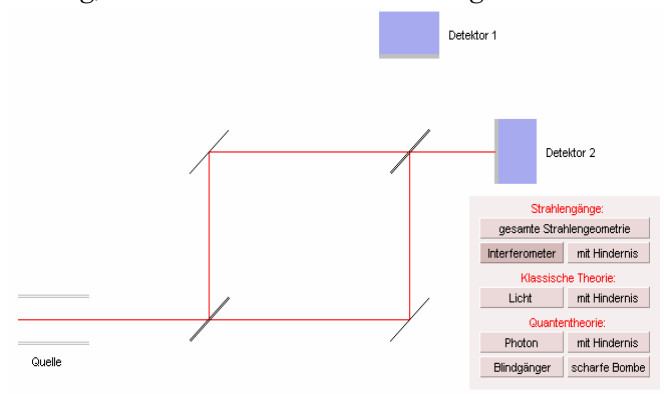
Wie funktioniert das Prinzip dieses Bombentests? Wenn man die Simulation startet, hat man die Möglichkeit, Buttons anzuklicken, die eine Beschreibung der Simulation, den physikalischen Hintergrund und den didaktischen Hintergrund in sich öffnenden Fenstern separat erklären. Einige diese Erklärungen werden nun auszugsweise zur Erklärung der Funktionsweise herangezogen.

Wenn man die Simulation aufruft, erscheint eine schematische Darstellung eines Mach Zehnder-Interferometers (siehe Simulation rechts). Der Button „Gesamte Strahlengeometrie“ ist bereits aktiviert und die grau eingezeichneten Linien stellen die Wege dar, die ein Lichtstrahl im Prinzip nehmen könnte.



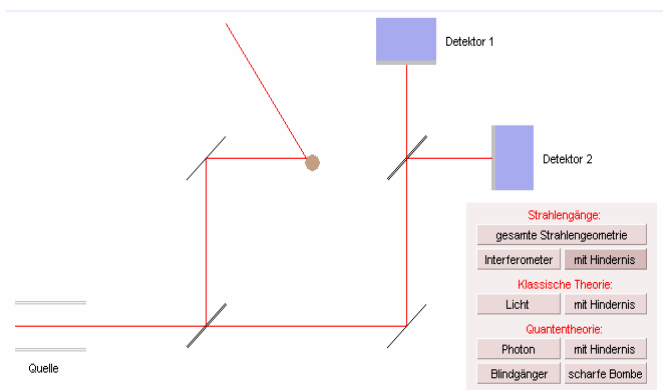
Doch die Beschreibung des Strahlengangs ist für den Bombentest nicht unbedingt so wichtig. Viel wichtiger ist die Darstellung, die erscheint, wenn man den links darunter liegenden Interferometer- Button drückt, wie Embacher in seiner Beschreibung formuliert:

Die obige Beschreibung ist nicht ganz richtig, oder zumindest unvollständig: sie lässt den interessantesten Effekt unter den Tisch fallen. Der besteht darin, dass in den Detektor 1 gar kein Licht fällt! Die zwei in den zweiten halbdurchlässigen Spiegel fallenden Teilstrahlen werden in je zwei weitere aufgespaltet, sodass wir es insgesamt mit vier Teilstrahlen zu tun haben, von denen jeweils zwei einander überlagern (interferieren). Die beiden in Detektor 2 fallenden Teilstrahlen haben jeweils eine identische "Geschichte" - sie wurden einmal nach links, dann nach rechts reflektiert. Wir müssen



gar nicht genau wissen, was mit einer Welle bei einer Reflexion passiert (monochromatische Wellen erhalten einen Phasensprung von $\lambda/4$), um zu sehen, dass diese beiden Teilwellen relativ zueinander keine Phasenverschiebung erlitten haben und daher die gesamte Intensität der ursprünglichen Welle vom Detektor 2 registriert wird. Da die gesamte Lichtintensität sich in einer solchen Anordnung nicht ändern kann, bleibt für den Detektor 1 "nichts übrig" - die dort einfallenden Teilstrahlen löschen einander aus! Diese Konfiguration (beide Wege sind frei) wollen wir als "Interferometer-Anordnung" bezeichnen.

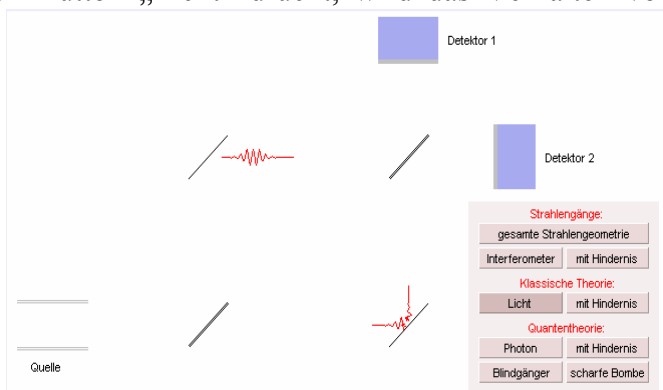
Wenn man nun den Button rechts daneben „mit Hindernis“ drückt, dann ändert sich natürlich der Strahlengang: Ein Teil des Lichts wird der Apparatur entzogen, und den am zweiten halbdurchlässigen Spiegel entstehenden zwei Teilstrahlen fehlen nun die "Partner" zu möglicher



Verstärkung oder Auslöschung. Insgesamt gehen 50 Prozent der ursprünglichen Intensität durch das Hindernis verloren, und je 25 Prozent werden von den Detektoren registriert. So erkennt man aus den Detektordaten leicht, ob ein Strahlengang versperrt ist: Das ist der Fall, wenn der Detektor 1 Licht registriert.

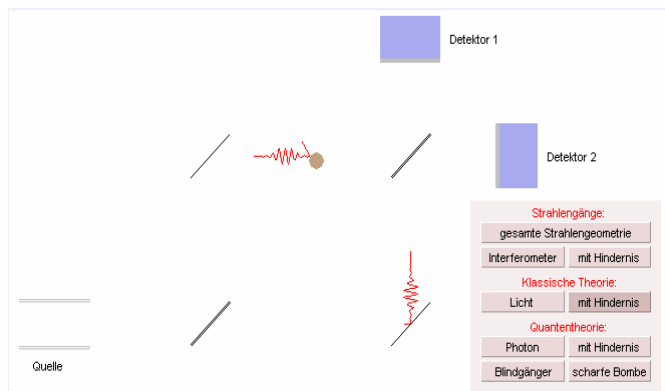
Nun kann man sich den Buttons zuwenden, die unter der Überschrift „Klassische Theorie“ zu finden sind. Wenn man den linken Button „Licht“ drückt, wird das Verhalten von „klassischen“ Lichtwellen

verdeutlicht (siehe Abb. rechts). Auch hier leuchtet der Detektor 1 nicht auf, da die nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel in Richtung Detektor 1 wandernden Teilwellen genau „negativ



zueinander“ (destruktive Interferenz) sind, sodass dort netto gar keine Welle existiert.

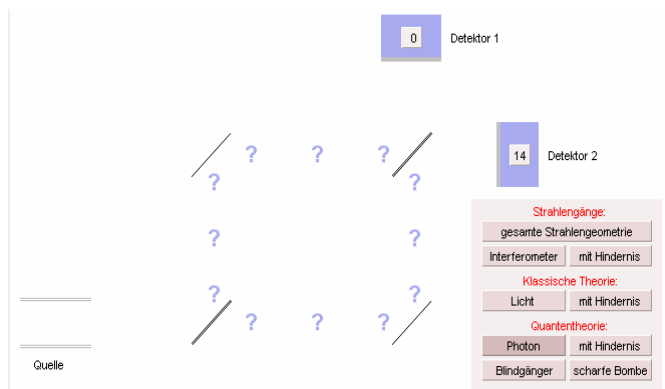
Dies ändert sich natürlich nun, wenn man den rechten Button „mit Hindernis“ drückt, da gemäß Embacher die Interferenzpartner jetzt fehlen, sodass auch für Detektor 1 etwas abfällt. Da nun die gemessenen Intensitäten nur mehr 25 Prozent der einfallenden Intensität



ausmachen, leuchten die Detektoren nicht so hell auf wie Detektor 1 in der Interferometer-Anordnung.

Nun kommen wir zum Teil der Darstellung, der unter der Überschrift „Quantentheorie“

abzurufen ist. Wenn man nun den Button „Photon“ drückt, dann erscheint folgendes Bild. Man sieht ein einzelnes Photon am Anfang des Wegs und am Ende wird es in Detektor 2 registriert. Dazwischen sieht man aber nur Fragezeichen



(siehe Abb. vorherige Seite). Wenn man mehrere Photonen auswerten will, muss man einfach nur immer wieder den Button betätigen.

Zur Erklärung des Sachverhalts sagt Embacher:

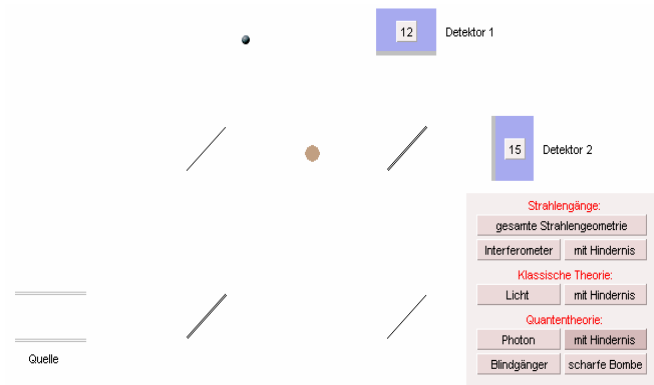
Licht besteht aus Teilchen, den Photonen .Es ist heute möglich, einzelne Photonen experimentell zu erzeugen. "Licht" im Alltagssinn ist einfach aus einer sehr großen Zahl von Photonen zusammengesetzt. Wird ein einzelnes Photon in die Apparatur geschossen, und ist kein Hindernis vorhanden, so macht das Photon genau dasselbe wie das "Licht" - es wird immer vom Detektor 2 registriert. Die Detektoren müssen nun sensibel genug sein, um einzelne Photonen zählen zu können. Es erscheinen Ausgabefelder, die die Anzahl der registrierten Photonen anzeigen. (Über die eingblendeten Fragezeichen wird sogleich zu reden sein). Der Versuch kann mit einem zweiten Photon durch erneutes Anklicken des Buttons wiederholt werden. Wieder ist das Resultat dasselbe. Dieses Verhalten kann experimentell nachgewiesen werden. Wir schließen also: Photonen verhalten sich so, als ob sie sich gemäß den Gesetzmäßigkeiten einer Welle bewegen. Damit kein Missverständnis aufkommt: Photonen sind Teilchen. Lassen Sie sich nicht erzählen, dass sie

"manchmal" eine Welle sind. Wann immer der Ort eines Photons gemessen wird, erscheint er nicht "ausgeschmiert", wie der "Ort" einer Welle, sondern lokalisiert, so wie man sich den Ort eines Teilchens vorstellt. Dennoch treten hier Interferenzerscheinungen auf. Irgendetwas "verbietet" es dem Photon, in den Detektor 1 zu gelangen.

Die Bedeutung der eingeblendeten Fragezeichen: Kann man entscheiden, welchen Weg ein Photon, nachdem es im Detektor 2 registriert wurde, genommen hat - den oberen oder den unteren? Um das zu tun, müsste man einen weiteren Detektor aufstellen, und dessen Effekt wäre der gleiche wie der eines Hindernisses.

Nach dieser Überleitung kommen wir zum nächsten Button „mit Hindernis“, bei dem Embacher erklärt:

Hier tritt nur ein extrem wichtiges Phänomen auf. Auch falls ein Hindernis einen der beiden Wege versperrt, verhält sich jedes einzelne Photon so wie das "Licht" in derselben Situation. Bei oftmaliger Wiederholung des Versuchs (durch Buttonklicks) wird statistisch gesehen etwa die Hälfte aller Photonen in gar keinen Detektor gelangen, sondern durch das Hindernis der Apparatur entzogen werden. Je ein Viertel wird von jedem Detektor registriert werden. Damit ist die Frage nach dem Weg eines Photons in der Interferometer-Anordnung entschieden: Er ist einer Messung nicht zugänglich, denn jeder weitere Detektor wirkt wie ein Hindernis und zerstört die Interferenz und damit den gesamten Versuchsaufbau!



Bei der Interpretation wird nun folgendes angegeben:

Über den Ort eines Photons lässt sich vor einer Messung im Allgemeinen nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage treffen - so als ob dieser Ort "gar nicht existieren würde", oder so als ob das Photon an allen möglichen Orten "gleichzeitig" wäre. Die Wahrscheinlichkeit für Messresultate gehorcht aber nun den Gesetzen einer Welle, weshalb man von einer Wahrscheinlichkeitswelle spricht...Die "Lichtwelle" ist also gar keine Messgröße - sie besteht nicht im Auftreten der physikalischen Erscheinung "Licht", sondern in der Möglichkeit des Auftretens

von Photonen. Sie ist eine Möglichkeitswelle! Nur bei einer sehr großen Zahl von Photonen erscheint sie uns als eine physikalische Realität. Das ist der Kern der Quantentheorie.

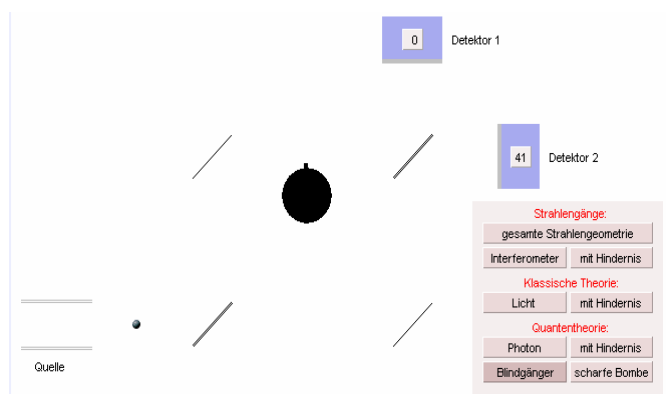
Nachdem nun alle grundlegenden Tatsachen erklärt worden sind, kommt Embacher zum Bombentest, um wie er selbst sagt, die erstaunliche Logik der Quantenwelt besser zu erschließen. Die Fragestellung lautet wie folgt:

Es stehen eine Reihe von Bomben zur Verfügung, deren Zündvorrichtung so sensitiv ist, dass sie beim Auftreffen auch nur eines einzigen Photons aktiviert wird. Diese Vorrichtung ist natürlich hinter einer Schutzkappe verborgen, damit die Bomben nicht durch das erstbeste Photon gezündet werden. Bei einigen der Bomben fehlt sie allerdings, obwohl diese "defekten" Bomben von außen genauso aussehen wie die anderen. Ist es nun möglich, zumindest einige der Bomben mit intakter Zündvorrichtung aufzuspüren, ohne sie zu sprengen?

Im Rahmen der klassischen Physik ist das Problem nicht lösbar, denn jedes "Hinsehen" benötigt zumindest ein Photon, das auf den Zünder trifft und daher die Bombe zur Explosion bringt.

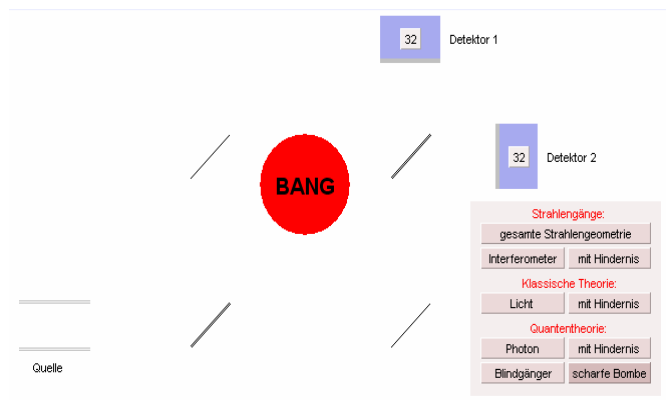
Wie kann man nun versuchen die Bomben zu entschärfen? Die Bomben werden so platziert, dass die Zündvorrichtung, falls vorhanden, den oberen Strahlengang blockiert. Natürlich muss, abgesehen von den hineingeschossenen Photonen, der Versuch im Dunkeln stattfinden, da die Schutzkappe abgenommen werden muss.

Falls die Bombe ein Blindgänger ist, also keine Zündvorrichtung hat, dann ist der obere Strahlengang frei, und es passiert dasselbe wie in der reinen Interferometer- Anordnung, jedes Photon wird in Detektor 2 registriert. (siehe Abb. rechts)



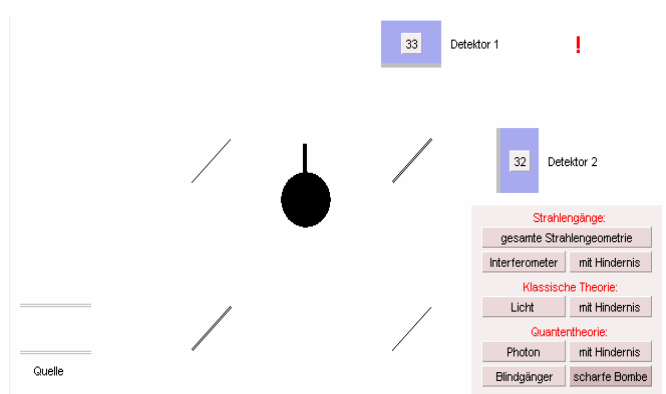
Falls es sich um eine scharfe Bombe handelt, wirkt die Zündvorrichtung wie ein Hindernis und es bestehen drei Möglichkeiten:

- Das Photon trifft auf das Hindernis, d.h. die Zündvorrichtung und die Bombe explodiert. Dann wissen wir natürlich, dass sie scharf war. Dies geschieht mit einer Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{2}$.



- Detektor 2 registriert das Photon. Dann können wir nichts aussagen, denn das kann auch bei einem Blindgänger passieren. Dies geschieht mit einer Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{4}$.

- Detektor 1 registriert das Photon. Dann wissen wir, dass der obere Strahlengang unterbrochen ist, d.h., dass die Bombe scharf ist. Und sie ist nicht explodiert! In diesem Fall erscheint ein Rufzeichen im Diagramm - eine scharfe Bombe wurde „sanft“ aufgedeckt. Dies geschieht ebenfalls mit einer Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{4}$.



Damit kann man zusammenfassend sagen, dass sich durch die Möglichkeit den Weg, den das Photon genommen hat, zu messen, eine Veränderung der Ergebnisse des Versuchs ergibt: Von ursprünglich allen emittierten Photonen zu nur noch einem Viertel der in die Versuchsanordnung „eingeschossenen“ Photonen.

Zu dem am Anfang des Unterkapitel eingeführten Begriff der wechselwirkungsfreien Messung bleibt noch zu sagen, dass nur bei einem Viertel der Messungen wirklich wechselwirkungsfrei eine scharfe Bombe festgestellt wird und in der Hälfte aller Fälle die scharfe Bombe explodiert.

Man sollte also den Begriff der wechselwirkungsfreien Messung nicht überstrapazieren, sondern schon das Hauptaugenmerk auf die wesentlichen Punkte bei der Erklärung des Mach Zehnder Interferometers richten, wie es ja auch im Aufbau der Simulation und deren Beschreibung geschieht.

Die Simulation hat sicherlich einige interessante Punkte zu bieten, die für den Einsatz im Unterricht sprechen. Vor allem die Einbettung in eine situativ interessante Fragestellung – das Entschärfen von scharfen Bomben- kann die Motivation, sich mit den Eigenheiten der „Zwei Wege“ Experimente auseinanderzusetzen, steigern, gegenüber der „normalen“ Behandlung des Mach Zehnder Interferometers.

Nach der letzten vorgestellten Simulation kommt auf der nächsten Seite noch eine kurze Übersicht der eben vorgestellten Simulationen, deren Quellen und Funktionen.

Übersicht über die vorgestellten Simulationen

Simulation	Abbildung/ Quelle	Funktion
Absorptions-Spektren	 http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/absorption.html	Erarbeitung des Spektrumbegriffs; Erklärung der Fraunhoferschen Linien; Veranschaulichung von Energiestufen
Emissions-spektren	 http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/emission.html	Ebenfalls Erarbeitung des Spektrumbegriffs; Spektrallinien als Eigenschaft der verschiedenen Elemente kennenlernen; Veranschaulichung von Energiestufen
Franck-Hertz-Versuch	 http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/FranckHertz.html	Der Standardversuch zur Begründung von Energiestufen in Atomen
Tunneleffekt	 http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/qtunneling.html	Veranschaulichung des Tunneleffekts; Vertiefung des stochastischen Aspekts der Quantenphysik
Doppel-Spalt-Versuch	 http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/doubleslit/index.html	Ein typischer Vertreter eines "Zwei Wege" Experiments; Wiederholung der de Broglie Beziehung; Verdeutlichung des Wesenszugs "Stochastische Vorhersagbarkeit"
Mach-Zehnder-Interferometer	 http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik	Auch ein typisches "Zwei Wege" Experiment; schöne Möglichkeit der Wegunterscheidung mit Polarisatoren, Simulation eines "Quantenradierers"
Bombentest	 http://www.univie.ac.at/future.media/qu/Quantentheorie.html	Illustration des Bombentests von Elitzur und Vaidmann; Möglichkeit, Elemente der Quantenlogik zu erklären

3.4 Erprobung von Simulationen im Unterricht

Die Erprobung der Simulationen im Unterricht fiel aus Zeitgründen relativ kurz aus. Da es sehr schwierig ist, achte Klassen im April für die Erprobung der Simulationen zu bekommen, da die Matura schon nahe ist und damit die Zeit für die Unterrichtenden kostbar ist, konnten nur zwei Unterrichtseinheiten verwendet werden. Die Arbeitsblätter zu den einzelnen Einheiten finden sich im Anhang B.

Einheit am 01.04.2004

In der ersten Einheit wollte ich feststellen, wie die Schüler mit den Arbeitsanweisungen auf der Visual Quantum Mechanics- Seite in eigenständiger Arbeit zurechtkommen. Außerdem wollte ich auch beobachten, ob die Verwendung einer Simulation, die in englischer Sprache verfasst ist, ein Problem für die Schüler darstellt. Es waren leider nur 10 von 20 Schülern im EDV-Saal des BRG 2 anwesend, und die reine Arbeitszeit betrug 40 Minuten.

Im Anhang B sieht man auf der ersten Seite das verwendete Arbeitsblatt. Gleich am Anfang wird darauf hingewiesen, dass bei Begriffen, die nicht klar sind, jederzeit gefragt werden kann. Natürlich wurden die Fachbegriffe auf dem Arbeitsblatt aus dem Englischen übersetzt.

Die zu behandelnden Simulationen waren der Doppelspaltversuch, der Quantentunneleffekt und der Franck Hertz Versuch. Die Arbeitsaufträge waren nicht sehr detailliert, eher sollten sich die Schüler selbst mit Hilfe der Beschreibungen bei den Simulationen damit auseinander setzen.

Im Unterricht teilte ich das Arbeitsblatt aus und die Schüler begannen zügig mit der Arbeit. Die Abfassung der Simulationen in englischer Sprache stellte für keinen der Schüler ein Problem dar.

Die Bedienung der Simulationen selbst stellte überhaupt kein Problem dar. Die Schüler kamen gut mit den Beschreibungen zu den Simulationen zurecht. Allerdings wurde im Laufe der Unterrichtsstunde immer deutlicher, dass die Schüler sich mit der eigenständigen Arbeit ohne exakte Arbeitsaufträge sehr schwer taten. Die Schüler konnten zwar mit den

Simulationen sehr gut umgehen, waren aber bis auf ein, zwei Ausnahmen nicht in der Lage, selbstständig ihre Ergebnisse zu dokumentieren und für sich aufzuzeichnen.

Ein Problem trat bei der Beschreibung des Tunneleffekts auf, welche sehr lange formuliert ist und bei der bei nochmaligem Einsatz eine verständlichere Aufgabenstellung nötig gewesen wäre.

Für mich ergab sich als Konsequenz, dass bei der nächsten Einheit die Schüler exaktere Arbeitsaufträge benötigen und auch die Möglichkeit am Arbeitsblatt gegeben sein sollte, die Ergebnisse aufzuzeichnen.

Einheit am 21.04.2004

Bei der Erarbeitung des Arbeitsblatts standen also exakte Arbeitsaufträge im Vordergrund. Wie man im Anhang B auf der zweiten und dritten Seite sehen kann, sind die Arbeitsaufträge genauer formuliert worden. Es waren wieder nur 10 von 20 Schülern anwesend. Die Stunde fand wieder im EDV-Saal, des BRG 2, statt und die Arbeitszeit betrug 35 Minuten, da zuvor noch eine kurze Erklärung stattfand.

Allerdings sollten, trotz der Arbeitsaufträge, doch noch Fragen dabei sein, die eine Interpretation seitens der Schüler erfordert und nicht ein Ausfüllen einer Ergebnistabelle darstellen.

Die Arbeitsweise im Unterricht wurde auch leicht modifiziert. Nach der Ausgabe der Arbeitsblätter konnte mittels eines Beamers, bei auftretenden Fragen für alle sichtbar eine Erklärung zu demonstriert werden.

Ich habe auch nur zwei Simulationen verwendet, damit kein großer Zeitdruck entsteht. Nach einer kurzen Erklärung, worum es bei diesen Versuchen geht, begannen die Schüler auch ganz zügig mit der Arbeit. Diesmal verlief die Abwicklung der Arbeitsaufträge viel zügiger und problemloser.

Dadurch hatte ich auch Zeit zu beobachten, inwiefern die einzelnen Lehrziele realisiert wurden. Die erste Frage, ob es verwunderlich ist, dass Elektronen beim

Doppelspaltversuch das gleiche Verhalten wie Photonen zeigen, war für die meisten Schüler schon aus den zuvor erfolgten Unterrichtsstunden bekannt und somit kein Problem.

Bei der Beobachtung der Simulation, wenn die Rate der Elektronen auf eine pro Sekunde heruntergestellt wurde, konnte man schön den stochastischen Wesenszug der Quantenphysik demonstrieren. Die Schüler erkannten zum Großteil gleich, dass sie den Ort der Registrierung des nächsten Teilchens nicht vorhersagen konnten, aber sehr wohl, dass sich bei sehr vielen Teilchen immer wieder dasselbe Muster abzeichnet.

Danach sollte das Augenmerk der Schüler darauf gelenkt werden, dass bei den verschiedenen Teilchenarten verschiedene Energien angegeben werden und verschiedene Spaltbreiten. Allerdings musste ich während der Erarbeitung dieser Frage feststellen, dass den Schülern die de Broglie Beziehung überhaupt kein Begriff war und es somit schwierig war, diesen Aspekt zu erarbeiten. Auch bei der nächsten Frage, die die Beziehung zwischen Energie und Frequenz der Photonen in Erinnerung rufen sollte, musste ich feststellen, dass diese den Schülern nicht bewusst war.

Damit war auch der Punkt mit den verschiedenen Energien der Elektronen nicht mehr so ertragreich an Erkenntnissen, allerdings waren die Schüler nach meiner kurzen Zwischenerklärung immer noch motiviert bei der Sache.

Bei der Erarbeitung des Franck Hertz Versuchs gab es bei der Bedienung keine Probleme und durch die kurze Erklärung am Arbeitsblatt hatten die meisten Schüler keine Schwierigkeiten. Sehr gut funktionierte der Punkt, bei dem die Schüler das in der Simulation gezeichnete Strom-Spannungs-Diagramm abzeichnen sollten und die Aussagen daraus zu ziehen waren. In Einzelgesprächen mit den Schülern konnten sehr viele das Diagramm richtig deuten.

Damit war die zweite Unterrichtseinheit sicherlich erfolgreicher als die erste. Abschließend ist noch anzumerken, dass nach diesen Computerstunden in der nächsten Stunde noch ein Vergleich der Ergebnisse stattfinden sollte und auch die Aussagen nochmals zusammengefasst werden sollten, damit diese nicht verloren gehen. Dies wurde auch seitens des Klassenlehrers angesprochen und von ihm in der nächsten Stunde gemacht.

3.5 Zusammenfassung

Der Einsatz des Computers bietet im Unterricht sehr viele Möglichkeiten. Nicht nur die allgemeinen Gründe in Kapitel 3.1, die für einen Einsatz des Computers im Unterricht sprechen, sondern auch die speziellen Argumente in Kapitel 3.2, sprechen sehr dafür.

Dass schon eine ganze Menge von verwendbaren Unterrichtsmaterialien in diesem Bereich zur Verfügung stehen, kann man an der Darstellung in Kapitel 3.3 sehen. Dabei sei noch erwähnt, dass dies nur eine Auswahl der verfügbaren Simulationen ist. Welche der zahlreichen Simulationen nun tatsächlich im Unterricht eingesetzt werden, ist sicherlich auch zum Teil Geschmackssache und hängt davon ab, welche Ziele man im Unterricht zur Quantenphysik verfolgt.

Die Erprobung im Unterricht war meiner Meinung nach sehr aufschlussreich, und vor allem hatten die Schüler mit der Bedienung der Simulationen keinerlei Probleme. Natürlich muss man bei manchen Simulationen noch Erklärungen für die Schüler hinzufügen, aber man wird durch eine motivierte Arbeitsweise der Schüler belohnt.

Abschließend kann man sagen, dass es genug Angebote gibt, um Simulationen im Unterricht einzusetzen, allerdings, wie sich auch in der Lehrerbefragung gezeigt hat, ist der Bekanntheitsgrad dieser Simulationen noch nicht sehr groß. Meiner Meinung nach wird sich dies aber bald ändern, da die Anwendungsmöglichkeiten gerade im Unterricht zur Quantenphysik so enorm sind und sehr wenig Alternativen dazu zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

Bader, Franz: Quantenphysik in der Schule. In: Kircher, Schneider (Hrsg.) Physikdidaktik in der Praxis. - Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2002. S.48-59

Burkhard, Ulrike/ Schecker, Horst: Status Quo des Quantenphysik- Unterrichts. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, voraussichtlich 2004.

Embacher, Franz: Simulation zum Bombentest von Elitzur und Vaidmann. Quelle:
<http://www.univie.ac.at/future.media/qu/Quantentheorie.html>

Feynman, Richard P.: QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. - München; Zürich: Piper Verlag, 2002, 8.Auflage.

Fischler, Helmut (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule. – Kiel: Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften, 1992.

Fischler, Helmut: Die Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenphysik“: Didaktische Grundsätze und inhaltliche Details. – In Fischler 1992: S.245-253.

Girwidz, Raimund: Neue Medien im Physikunterricht. In: Kircher, Schneider(Hrsg.) Physikdidaktik in der Praxis. - Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2002. S.230-236.

Heisenberg, Werner: Quantentheorie und Philosophie. Vorlesungen und Aufsätze. – Stuttgart: Reclam, 1979.

Hey, Tony/ Walters, Patrick: Das Quantenuniversum. Die Welt der Wellen und Teilchen. – Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, 1998.

Huber, Albert: Mach Zehnder Interferometer. Quelle:
<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfer.htm>

- Jaeckel, Klaus/ Pade, Jochen:* EPR-Paradoxon in der Schule – Spukhafte Fernwirkung und Bertlmanns Socken. In: Fischler 1992, S.134-155.
- Kirchhoff, Hans-W.:* Vorstellungen vom Atom 1800-1934; Von Dalton bis Heisenberg. – Köln: Aulis Verlag Deubner & Co KG, 2001.
- Kiss, Andrea:* Lernen mit Notebooks – „Neues Lernen“. - Skriptum zum Notebookseminar Graz Quelle: NWW CD-ROM für Seminar, 2003.
- Küblbeck, Josef / Müller, Rainer:* Die Wesenszüge der Quantenphysik. Modelle, Bilder, Experimente. – Köln: Aulis Verlag Deubner, 2003.
- Kuhn, Wilfried:* Quantenmechanik- Eine wissenschaftstheoretisch reflektierte Analyse ihres ideengeschichtlichen Entwicklungsprozesses. In: Fischler 1992, S.29-69
- Kwiat, Paul/ Weinfurter, Harald/ Zeilinger, Anton:* Wechselwirkungsfreie Quantenmessung. In Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S.21-22.
- Lichtfeld, Michael:* Erprobungen der „Einführung in die Quantenphysik“: Lernprozesse und Veränderungen von Vorstellungen. – In Fischler 1992: S.253-269.
- Mayer, Andrea:* Webphysics, eine S4- Studie. Auf der Internetseite <http://www.physicsnet.at/quellen/studien/S4-Dokumentation-Mayer-03.pdf>
- Muthsam, Klaus:* Doppelspaltsimulation. Quelle: <http://www.physk.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/doppelspalt.htm>
- Pietschmann, Herbert:* Phänomenologie der Naturwissenschaft. – Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag 1996.
- Pietschmann, Herbert:* Quantenmechanik verstehen. Eine Einführung in den Welle-Teilchen-Dualismus für Lehrer und Studierende. - Berlin; Heidelberg; New York; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio: Springer Verlag, 2003.

Physics Education Research Group, Kansas University: Visual Quantum Mechanics.

Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm>

Prenzel, M./ Senkbeil, M./ Ehmke, T./ Bleschke, M.: Didaktisch optimierter Einsatz Neuer Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. - IPN, 2002.

Sexl, Roman: Albert Einstein, wie seine Theorien die Physik auf den Kopf gestellt haben. - Bild der Wissenschaft 3, 1979.

Sexl/ Raab/ Streeruwitz: Physik 2 – Wien: Verlag Hölder – Pichler – Tempsky, 1990.

Sexl/ Raab/ Streeruwitz: Physik 4 – Wien: Verlag Hölder – Pichler – Tempsky, 1992.

Simonyi, Karoly: Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute. - Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2001.

Von Weizsäcker, Carl F.: Große Physiker. Von Aristoteles bis Werner Heisenberg. – München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1999.

Weinert, F.E.: Selbstgesteuertes Lernen als Voraussetzung, Methode und Ziel des Unterrichts. - Unterrichtswissenschaft 2. 1982.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/absorption.html>

Abbildung 2: Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/emission.html>

Abbildung 3: Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/FranckHertz.html>

Abbildung 4: Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/qtunneling.html>

Abbildung 5: Quelle: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/doubleslit/index.html>

Abbildung 6: Quelle:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/doppelspalt.htm>

Abbildung 7: Quelle:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfer.htm>

Abbildung 8: Quelle: <http://www.univie.ac.at/future.media/qu/Quantentheorie.html>

Anhang A (Interviewfragen)

I: Unterrichten Sie üblicherweise in der achten Klasse das Thema Quantenmechanik?

I: Welche Begriffe sind Ihnen in der Quantenphysik besonders wichtig? Die Wertung geht von Sehr wichtig (1) bis Nicht wichtig (5)

I: Unschärferelation?

I: Bohr'sches Atommodell?

I: Korrespondenzprinzip?

I: Quantenzahlen?

I: Doppelspaltexperiment?

I: Energieniveaus?

I: Pauli-Prinzip?

I: Photoeffekt?

I: Materiewellen?

I: EPR-Paradoxon?

I: Welche Begriffe, als Minimalziel, sollte ein Schüler am Ende des Unterrichts über Quantenphysik in eigenen Worten erklären können?

I: Wo haben Sie sich Ihr Wissen zur Quantenphysik erworben?

I: Welche Materialien verwenden Sie zur Unterrichtsvorbereitung der Quantenphysik?

I: Welche Medien verwenden Sie im Unterricht der Quantenphysik?

I: Haben Sie schon Multimediamaterial im Unterricht zur Quantenphysik verwendet?

I: Wenn Sie einem interessierten Schüler ein Buch zur Quantenmechanik vorschlagen, welches würden Sie empfehlen?

I: Haben Sie Wünsche zur Verbesserung des Unterrichtens der Quantenphysik? (z.B. Verbesserung der Materialien, mehr Multimediaunterstützung, Fortbildung usw.)

I: Wie viele Unterrichtseinheiten verwenden Sie üblicherweise für den Block Quantenphysik?

I: Was sind typische Fragen seitens der Schüler zur Quantenphysik?

I: Wann werden diese Gebiete unterrichtet achte Klasse, am Anfang, am Ende?

Anhang B

Arbeitsblatt: Computersimulationen zur Quantenphysik

Die heute verwendete Seite ist in Englisch abgefasst worden. Dies sollte jedoch kein Problem darstellen. Falls Euch Begriffe nicht bekannt sind fragt einfach nach!

Die Seite von der man die Simulationen aufruft lautet: <http://phys.educ.ksu.edu/vqm>
Es erscheinen nun eine ganze Menge Links, die zu Simulationen führen, wir werden uns aber auf drei beschränken:

1. Double Slit Diffraction (Doppelspaltexperiment)

Bitte lest Euch die Angabe durch und arbeitet Euch Step für Step durch!
Wenn Ihr alle Steps durchgegangen seid, dann schreibt Ihr Euch die Kommentare, wie im Step 6 vorgeschlagen, auf. Am besten in elektronischer Form (z.B. in einem Word Dokument). Ihr könnt auch einen Screenshot ins Dokument einfügen. (Zuerst Alt +Drucken zum Kopieren, dann Strg + V zum Einfügen).

Falls Ihr ein bisschen unterstützende Literatur braucht: Im Buch (Sexl4) auf S 54. steht auch etwas zum Doppelspaltexperiment.

2. Quantum Tunneling (Tunneleffekt)

Auch hier bitte geht Step für Step vor! Allerdings nur Step 1-3. Macht Euch wieder Notizen zu dem was Euch aufgefallen ist!

Unterstützende Literatur: Sexl 4, S58.

3. Franck-Hertz- Experiment

Da bei dieser Simulation keine Erläuterungen stehen, lest Euch bitte zuerst im Buch auf Seite 66 durch, was der Franck- Hertz Versuch denn überhaupt zeigt.
Nachdem Ihr die Beschreibung des Versuchs gelesen habt, sollte es nicht zu schwer sein, die Simulation zu starten und das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Falls Probleme auftreten, könnt Ihr natürlich jederzeit fragen! (Zwei Vokabeln: Filament= Glühdraht; Grid= Gitter)

Wenn Ihr ein schönes Bild habt, dann fügt es doch wie beim Doppelspalt in Eure Dokumentation ein!

Falls jetzt noch jemand Zeit hat, kann sie/er sich ja an Step4 und Step5 beim Quantum Tunneling versuchen.

Computersimulationen zur Quantenphysik

Bitte geh auf die Internetseite <http://phys.educ.ksu.edu/vqm>

Es erscheinen eine ganze Menge Links, von denen wir nur zwei benutzen werden.

1. Double Slit Diffraction (Doppelspaltexperiment)

Wenn Du die Simulation aufrufst, verwende bitte die Elektronen (Electrons) zuerst! Lass die Spaltbreite auf 5 nm und die Energie auf 100 eV und die Rate (particles per second) auf max. Nach dem sich ein Bild am Schirm abzeichnet, kannst Du den Schirm auf der rechten Seite ablegen. Was kann man beobachten? Ist es verwunderlich, dass Elektronen das gleiche Verhalten wie Licht zeigen?

.....
Wenn man nun die Frequenz auf die niederste Stufe stellt, so fliegt immer nur ein Teilchen pro Sekunde durch den Doppelspalt. Kann man voraussagen, wohin das einzelne Elektron auf dem Schirm landen wird? Wird sich nach einiger Zeit das gleiche Bild abzeichnen?

.....
Du kannst Dir nun ein Bild von den anderen Teilchenarten machen. Verwende bitte die *Neutronen*, *Elektronen* und *Photonen*. Wenn Du die Simulationen zu den einzelnen Teilchenarten startest, was fällt Dir auf? Inwiefern unterscheiden sich die Spaltbreiten in ihren Bereichen?

.....
Inwiefern sind die Energien unterschiedlich und warum gibt es bei den Photonen nur Angaben der Wellenlänge? Kann man die Wellenlänge des Lichts in Verbindung mit dessen Energie setzen und wenn ja, wie?

.....
.....
Noch mal zu den Elektronen zurück:

Wenn man die Energie auf 100 eV stellt und mehrere „Aufnahmen“ mit verschiedenen Spaltbreiten macht, was kann man beobachten? Du kannst die einzelnen Resultate rechts ablegen (max. 4 Stück). Bitte skizziere Dir die verschiedenen Resultate, also die erhaltenen Bilder am Schirm, und schreib Dir Kommentare (vor allem Spaltbreite) auf!

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Dasselbe machst Du nun bitte mit den Energien! Stelle die Spaltbreite auf 5nm und variiere die Energien. Mach Dir bitte wieder Skizzen der Ergebnisse und schreib Dir Kommentare auf!

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

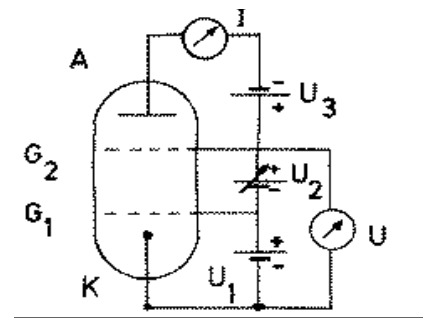
Was hat man beobachten können und wovon hängen Deiner Meinung nach die Ergebnisse ab?

.....

.....

2. Franck – Hertz - Experiment

Beim Franck Hertz Versuch handelt es sich um den experimentellen Nachweis, dass Atome Energie nur in bestimmten Stufen, keineswegs kontinuierlich aufnehmen. In einem mit Quecksilberdampf gefüllten Rohr legt man eine veränderbare Spannung zwischen einer Glühkathode (engl. Filament) und einer gitterförmigen Anode (engl. grid) an. (siehe Schema rechts) Es wurde herausgefunden, dass mit zunehmender Anodenspannung der Strom zunächst zunimmt, jedoch bei Erreichen einer Spannung von 4,9 V der Strom abrupt abnimmt. Dies wiederholt sich bei der doppelten und dreifachen Spannung.

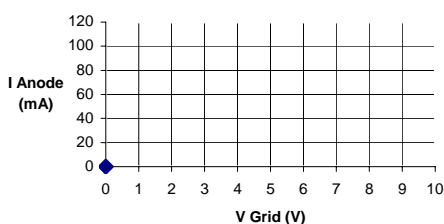


Man kann das folgendermaßen interpretieren: Offensichtlich können Hg Atome eine Energie von genau 4,9 eV aufnehmen. Sie gehen dabei aus dem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand über. In den Grundzustand kommen sie wieder durch Abgabe elektromagnetischer Strahlung.

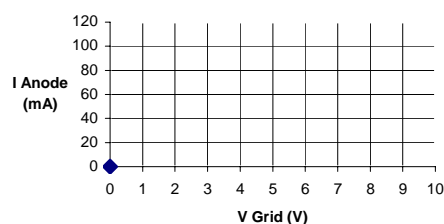
Zur Simulation:

Verwende bitte zuerst Neon (orange). Stelle die Filament Voltage auf 5V und variiere die Grid Voltage über den ganzen Bereich. Du erhältst ein Strom - Spannungs Diagramm. In das gleiche Diagramm zeichne die Kurve für eine Filament Voltage von 10 V. Mache eine Skizze und beschreibe die zwei Kurven. Wo liegen die Unterschiede, wo die Gemeinsamkeiten? Mache dieselbe Prozedur mit Hg (violett) und skizziere ebenfalls die Ergebnisse! Wenn du die zwei Skizzen vergleichst, welche Unterschiede fallen Dir auf?

Strom - Spannungs Diagramm



Strom - Spannungs Diagramm



Lebenslauf

Walter Doubek

Geburtsdatum: 24.11.1976

Geburtsort: Wien/Österreich

Adresse: Ybbstrasse 15-21/5/16, 1020 Wien

Ausbildung:

- 1983 -1987 Volksschule Vorgartenstrasse 191, Wien 2.
- 1987-1995 BG und BRG Wien 2, Wohlmutstrasse 3
- 1995 Matura mit Auszeichnung
- 1995-1996 Ableistung des Präsenzdienstes
- 1996 Studium an der TU Wien (Technische Physik)
- 1999 Wechsel der Studienrichtung: Studium an der Uni Wien (Lehramt Physik und Lehramt Mathematik)
- 2001 1. Diplomprüfung in Physik und Mathematik bestanden