

**„TREFFPUNKT QUANTENMECHANIK: VOM EXPERIMENT ZUM
MODERNEN WELTBILD – PHYSIK TRIFFT PHILOSOPHIE’**
- Beschreibung des neuen Schülerlabors der Universität
Dortmund -

B. Weferling*, B. Falkenburg⁺, R. Huber⁺⁺, A. Pflug*, B. Siegmann**, W.
Rhode***

*Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität Dortmund, Otto-Hahn-
Straße 4, 44221 Dortmund, **Fachbereich Physik, Universität Dortmund,
Otto-Hahn-Straße 4, ***Lehrstuhl für Experimentelle Physik IV, Universität
Dortmund, Otto-Hahn-Straße 4, 44221 Dortmund, ⁺Lehrstuhl für
Philosophie, Universität Dortmund, Otto-Hahn-Straße 4, 44221 Dortmund,
⁺⁺Lehrstuhl für theoretische Philosophie, Universität Dortmund, Otto-
Hahn-Straße 4, 44221 Dortmund

Kurzfassung

Die Universität Dortmund richtet beginnend im Herbst 2007 ein Schülerlabor zum Thema Quantenmechanik ein. Besonders hierbei ist die Zusammenarbeit der Fachbereiche Physik und Philosophie. Gemeinsam sollen die Schüler vom konkreten physikalischen Experiment an die philosophischen Implikationen der Theorie der Quantenmechanik und ihre Bedeutung für unser modernes Weltbild herangeführt werden. Die Verbindungen zwischen Schule und Universität sollen dabei gestärkt und Missverständnisse und Hemmschwellen zwischen den beiden Bereichen überwunden werden, um sowohl schulische als universitäre Lehre zu verbessern.

1. Einleitung

Ein modernes Weltbild kann die Erkenntnisse der Quantenmechanik und ihre philosophischen Implikationen nicht ignorieren, zugleich sind die Grundlagen dieser Theorie immer noch umstritten. Jedoch dringen sowohl die philosophischen Implikationen als auch die physikalischen Erkenntnisse zumeist nur in Ansätzen, in Form von populärwissenschaftlichen Beiträgen von wechselnder Qualität bis in die Breite der Bevölkerung durch. Eine quantenmechanische Revolution des Weltbildes ähnlich der Kopernikanischen Revolution ist deswegen bislang ausgeblieben, ein Paradigmenwechsel hat nicht stattgefunden. Mit Bezug auf die Quantenmechanik denken die meisten Menschen sozusagen immer noch, die Erde sei eine Scheibe.

Für diesen Zustand machen wir weniger eine der Quantenmechanik inhärente

Komplexität oder den hohen Grad an Abstraktheit verantwortlich, man findet beides auch bei anderen physikalischen Konzepten, die weiter verbreitet sind, sondern eine unzureichende didaktische Durchdringung der Materie sowohl auf Schul- als auch auf Hochschulebene. Zum Teil ist dies entschuldbar, die Quantenmechanik ist in der Tat komplex und ihre Deutung noch umstritten und 80 Jahre sind für einen Paradigmenwechsel kein langer Zeitraum, sondern eher kurz. Wir finden es jedoch an der Zeit diesen Zustand zu ändern. Auf populärwissenschaftlichem Weg sind Bruchstücke der Theorie, wenn auch oft falsche oder zumindest missverständlich, in breitere Bevölkerungsschichten vorgedrungen. Leider erhält die Quantenmechanik dabei oft den Nimbus einer nur dem Fachmann zugänglichen Materie, oft bleibt aber auch eine gewisse Faszination und der Wunsch nach vertieftem Verständnis, dies gilt insbesondere für naturwissenschaftlich

interessierte Schüler und Studenten. Dieses Bedürfnis wird jedoch an Schulen und Hochschulen aus verschiedensten Gründen nur unzureichend gestillt. Den Schulen stehen zum Beispiel elementare Versuchsaufbauten zur vertiefenden Einführung in die Quantenmechanik nicht zur Verfügung, auch fühlen sich die Lehrer oft von der Thematik überfordert und unterliegen selbst dem Missverständnis, nur eine universitäre Fachkraft könne sich kompetent zum Thema Quantenmechanik äußern. Und so wird der entscheidende Brückenschlag zur Philosophie oft nicht getan.

Die Fachbereiche Physik und Philosophie wollen mit der Errichtung eines gemeinsamen Schülerlabors, dem „Treffpunkt Quantenmechanik“, einen Beitrag zur Veränderung dieser Situation leisten. Wir erhoffen uns dabei eine Wirkung des Projekts entlang einer Reihe von Kanälen: den Schulen der näheren und weiteren Umgebung soll im Rahmen des Treffpunkts Quantenmechanik Zugang ermöglicht werden zu einer Reihe von Versuchen, welche vertiefend in die Quantenmechanik einführen und so den meisten Schulen nicht zur Verfügung stehen. Es sollen Begegnungen zwischen Schülern, Lehrern und Wissenschaftlern initiiert werden, die zu einem Abbau der Hemmschwellen einerseits und einer besseren Einsicht in die Verständnisprobleme der Schüler und die didaktischen und fachlichen Probleme der Lehrer andererseits führen sollen. Einzelnen Schülern und Lehrern soll ein Ort bereitgestellt werden, an dem sie sich mit besonderer Intensität der Thematik widmen können. Wesentlich hierbei ist der gemeinsame Entwurf und die gemeinsame Begleitung des Projekts durch Philosophie und Physik mit dem Ziel auch hier künstliche Barrieren abzubauen und zu einem ganzheitlichen Verständnis beizutragen.

Im Treffpunkt Quantenmechanik sollten Schüler und Lehrer auf Wissenschaftler treffen, Physik auf Philosophie, Experiment auf Erkenntnis, Fragen auf Antworten, Schule auf Universität und klassisches auf nicht-klassisches Weltbild.

Im Folgenden soll der Treffpunkt Quantenmechanik im Einzelnen

vorgestellt werden. Wir haben die Hoffnung damit im günstigen Fall sowohl Impulse für weitere Projekte zu geben als auch zu einem kritischen Diskurs einzuladen.

2. Einordnung des didaktischen Konzepts

2.1 Optimierung der laborspezifischen didaktischen Wirkmöglichkeiten

In der Physikdidaktischen Forschung wird - wie Engelen und Euler (2004) es ausdrücken - „die Rolle des Experimentierens im *Schulunterricht* zunehmend kritischer bewertet. Experimente haben dort nicht unbedingt die lern- und motivationsfördernde Funktion, die man ihnen gewöhnlich unterstellt.“ Dieselben Autoren verweisen exemplarisch auf die Ergebnisse von Hodson (1993), Harlen (1999) und Euler (2004), welche festhalten, dass Schülern ein oft unzulängliches induktives Wissenschaftsbild und oft nur der Umgang mit der jeweiligen Versuchsausrüstung, nicht jedoch mit dem hinter dem Experiment stehenden Konzepten vermittelt wird, da die im Unterricht durchgeführten Experimente häufig streng geführt sind.

Ein physikalisches Schülerlabor kann grundsätzlich eine Reihe didaktischer Funktionen erfüllen: z. B. die Demonstration der Schlüsselrolle, welche das Experiment im physikalischen Erkenntnisprozess spielt, die Aktivierung handlungsorientierter Lernkanäle durch Förderung schülerischer Eigenaktivität, Steigerung des Schülerinteresses und vieles weitere mehr. Neben diesen Aspekten ist es bei einem Schülerlabor zur Quantenmechanik von besonderer Bedeutung, die oft abstrakten und teilweise kontraintuitiven Aussagen der Quantenmechanik erlebbar zu machen. Wir gehen im Treffpunkt Quantenmechanik von der Annahme aus, dass das *konkrete Erfahren* und in einigen Versuchen sogar das *Sehen mit eigenen Augen* im Rahmen von *mit den eigenen Händen* durchgeführten Versuchen eine besondere Überzeugungskraft mit sich bringt, welche es den Schülern erleichtert,

zunächst widersprüchlich erscheinende Konzepte (z. B. den Welle-Teilchen-Dualismus) zu akzeptieren. Die fachdidaktische Forschung konnte die Validität dieser Annahme bislang nur in begrenztem Maße verifizieren, aber die bisherigen Resultate sind ermutigend. Wir hoffen mit dem Treffpunkt Quantenmechanik einen zusätzlichen Beitrag zur Untersuchung dieser Fragestellung leisten zu können.

Im Rahmen von Schülerlaboren ist es möglich, die Schüler freier als im Schulunterricht an Experimente heranzuführen und sie mehr Eigeninitiative entwickeln zu lassen. Untersuchungen der Initiative Lernort-Labor (Dähnhardt 2005) weisen die positive Langzeitwirkung von Schülerlaboren sowohl im Hinblick auf die Förderung des Schülerinteresses und des Verständnisses der naturwissenschaftlichen Methode, aber beispielsweise auch in der Heranführung von Problemgruppen an die Thematik nach (Euler 2004). Empirische Untersuchungen dieser Art zu Schülerlaboren mit dem spezifischen thematischen Schwerpunkt Quantenmechanik sind uns leider nicht bekannt, wir vermuten, dass die empirische Basis, zumindest im nationalen Rahmen, für solche Untersuchungen zum jetzigen Zeitpunkt eventuell noch nicht tragfähig genug ist um gesicherte Erkenntnisse zu gewährleisten. Wir verweisen jedoch in diesem Zusammenhang auf Projekte mit ähnlicher Thematik, wie zum Beispiel das Schülerlabor Quantensprung (siehe Quantensprung 2007).

Die Initiative Lernort Labor stellt jedoch eine Reihe von Kriterien fest, welche erfüllt sein müssen, damit ein Schülerlabor einen didaktischen Vorteil gegenüber dem schulischen Experimentieren erzeugen kann, und macht darüber hinaus, auf der Basis ihrer Analysen, eine Reihe von weitergehenden Anregungen, wie ein Schülerpraktikum möglichst erfolgreich gestaltet werden kann. Wir haben die meisten dieser Maßnahmen bei der Planung des Treffpunkts Quantenmechanik berücksichtigt (siehe z.B. Euler 2004):

-Vernetzung der Labore und Erfahrungsaustausch sowie systematische Evaluation: Treffpunkt Quantenmechanik nimmt zu diesen Zwecken an der Initiative Lernort Labor teil;

-Verknüpfung der Labore mit der Ausbildung von Lehrkräften: der Treffpunkt Quantenmechanik kooperiert eng mit dem Lehrstuhl für Didaktik der Physik, der für die Lehrerausbildung an der Universität Dortmund verantwortlich ist, Lehramtskandidaten werden die Möglichkeit haben, im Labor als Betreuer tätig zu werden und Examensarbeiten zu schreiben;

-Weiterbildung: Der Treffpunkt Quantenmechanik wird Möglichkeiten für die Weiterbildung von Lehrkräften anbieten (z.B. Bibliothek, Austausch mit Fachwissenschaftlern und Didaktikern);

-Fokussierung: der Treffpunkt Quantenmechanik ist thematisch klar umrissen;

-Authentizität: der Treffpunkt Quantenmechanik ist inmitten der Universität Dortmund, teilweise Tür an Tür mit forschenden Wissenschaftlern, angesiedelt, Wissenschaftler übernehmen einführende Vorträge und teilweise Betreuungsaufgaben, so dass die Schüler die Möglichkeit haben, in direkten Kontakt mit den Wissenschaftlern zu treten und sie in einer authentischen Umgebung zu erleben;

-selbstständige Bearbeitung von authentischen Problemen: die Versuche im Treffpunkt Quantenmechanik werden durch schriftliche Anleitungen und durch Betreuung so begleitet, dass sie den Schülern zur weitestgehenden selbständigen Tätigkeit anregen sollen.

In den folgenden Kapiteln finden sich ausführlichere Informationen zur Umsetzung dieser und weiterer Maßnahmen.

2.2 Parallelen zu didaktischen Konzepten für die Quantenmechanik

Es sind eine Reihe von didaktischen Konzepten zur Quantenmechanik entwickelt worden: Der von Brachner

und Fichtner in den 1970er Jahren entwickelte Kurs (Brachner & Fichtner 1977; Brachner & Fichtner 1980) lehnt sich an die Vorlesungen von R. Feynman (Feynman, Leighton & Sands 1966) an. Berg analysierte in den 1980er Jahren typische Lernschwierigkeiten von Schülern im Zusammenhang mit Schülervorstellungen, wie beispielsweise die starke Verknüpfung des Photons mit der Teilchenvorstellung oder das Lösen der Schüler vom Bohrschen Atommodell, und entwickelte darauf basierend das sogenannte Berliner Konzept (Berg u.a. 1989). Wir wollen die Erkenntnisse Bergs in unser didaktisches Vorgehen einfließen lassen. Insbesondere die Zusammenarbeit mit dem Institut für Philosophie und die Schwerpunktsetzung auf Interpretationsfragen erlauben uns eine ausführliche Beschäftigung mit der Begriffsbildung und eine Auseinandersetzung mit den Präkonzepten der Schüler (siehe Abschnitt 3.2).

Didaktische Konzepte zum Thema Quantenmechanik konzentrieren sich zumeist auf den Schulunterricht und lassen sich nur in sehr eingeschränktem Maße auf Schülerlabore anwenden. Die didaktische Konzeption des Treffpunkts Quantenmechanik, die Physik und Philosophie verbindet, steht am ehesten noch dem Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik (Müller und Wiesner 2000) bzw. auch dem Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in der Quantenmechanik (Müller, Wiesner und Schorn 2006) nahe, insofern, als dass diese die Deutungsfragen der Quantenmechanik stärker betonen, als dies beispielsweise im Berliner Konzept (siehe z.B. Fischler 1992, Fischler und Lichtfeld 1994) der Fall ist. Die im Treffpunkt Quantenmechanik angebotenen Experimente (siehe Abschnitt 3.4) führen zu manchen Aspekten vertiefend über sowohl das Münchner als auch das Berliner Konzept hinaus. Uns erscheint dies nur im Rahmen eines Schülerlabor möglich, indem die spezifischen didaktischen Vorteile (siehe 2.1.) gegenüber dem Schulunterricht genutzt werden.

Komplettiert wird unsere Vorgehensweise schließlich durch die Verwendung von Computersimulationen, wie sie beispielsweise im Konzept Visual

Quantum Mechanics (Thaller 2000 und Thaller 2004) vorgestellt werden.

3. Ausführliche Beschreibung des Schülerlabors „Treffpunkt Quantenmechanik“

3. Differenzierte Zielsetzung des Projekts

In den Räumen der Universität soll ein Schülerpraktikum mit Versuchen zu dem Schwerpunkt Quantenmechanik aufgebaut werden. Das Praktikum dient zur Intensivierung der Kontakte zwischen Schule und Universität sowie der Interessenförderung bei Schülerinnen und Schülern und schließlich dem Bereich der Physikdidaktik als Forschungsfeld. Bezüglich Letzterem ist vor allem eine Optimierung der Anpassung schulischer und universitärer Lehrpläne (im Rahmen der neuen Bachelor/Master Studiengänge) avisiert.

Mit dem Vorhaben möchte der Fachbereich Physik sein sehr erfolgreiches Programm zur Zusammenarbeit mit Schulen ergänzen. Bislang wurden Themen der nicht nur in Dortmund aktuellen Forschung auf Sonderveranstaltungen wie der Reihe „Physik zwischen Brötchen und Borussia“ (allgemeinverständliche Physikvorträge am Samstagvormittag), der „Herbstakademie Physik“ (Informationsveranstaltungen für Schüler in den Herbstferien) sowie Universitätsveranstaltungen („Schnupper-Uni“ für Schülerinnen und Schüler etc.) vorgestellt. Nun soll, auch auf den stärker werdenden Wunsch von Schulen nach Zusammenarbeit mit der Universität hin, der Lernort Universität mit allen darin liegenden Kontaktmöglichkeiten erschlossen werden. Bei der Planung des Treffpunkts Quantenmechanik wurden die Stellung der Quantenmechanik in den gegenwärtigen und geplanten Lehrplänen (s.u.) und die instrumentellen Ausstattungen der Schulen berücksichtigt. Vermittelt werden soll inhaltliches, methodologisches und wissenschaftstheoretisches Wissen. Dazu werden didaktische Konzepte, die bereits an der Universität Dortmund entwickelt und erprobt wurden, eingebracht.

Im Treffpunkt Quantenmechanik soll den Schülerinnen und Schülern die Schlüsselfunktion der Quantenmechanik erlebbar und einsichtig gemacht werden. Dies erfolgt durch:

- a.) Schülerexperimente zu Standardversuchen der Quantenmechanik
- b.) Vorführung von Demonstrationsexperimenten
- c.) selbstständige Bearbeitung von quantenmechanischen Problemstellungen
- d.) Erarbeitung von und Umgang mit quantenmechanischer Begrifflichkeit
- e.) Begegnungen mit Wissenschaftlern
- f.) Informationen über die aktuelle Forschung
- g.) Austausch von Lehr-Lernerfahrungen der Lehrenden untereinander
- h.) Erstellung von Unterrichtsmaterialien

Der Treffpunkt Quantenmechanik soll ausgebildeten Lehrern zur Fortbildung zur Verfügung stehen. Er soll (auch) im Rahmen der Ausbildung von Lehramtskandidaten (Abschlussarbeiten) aufgebaut und weiterentwickelt werden.

Am Treffpunkt Quantenmechanik sollen mit einem didaktischen Konzept, in das fachliche, fachdidaktische und schulpraktische Erfahrungen, aber auch wissenschaftstheoretische Überlegungen eingehen, neue Wege der Kooperation besprochen werden. Deshalb wird der Treffpunkt Quantenmechanik in enger Zusammenarbeit des Fachbereichs Physik und des Institutes für Philosophie mit Schulen im Einzugsbereich der Universität Dortmund geplant. Am Lernort Universität sollen den Schülerinnen und Schülern Versuche zur Verfügung gestellt werden, die nicht von einzelnen Schulen finanziert werden können. Durch die inhaltliche Ausrichtung auf die Quantenmechanik soll Lehrern die Möglichkeit eröffnet werden, dieses Thema in einem dreitägigen Kurs mit ihren Schülerinnen

und Schülern eingebettet in den regulären Schulunterricht zu erarbeiten. Des Weiteren steht der Treffpunkt Quantenmechanik Schülerinnen und Schülern für Ferienpraktika und Facharbeiten offen.

Der Treffpunkt Quantenmechanik ist zur Unterstützung dieser Zielsetzung mit einer Spezialbibliothek ausgestattet, welche neben Physiklehrbüchern auf schulischem und universitären Niveau auch Werke zur Quantenphilosophie, populär- und geschichtswissenschaftliche Literatur zum Thema, interaktive computergestützte Lernmedien und schließlich Originalarbeiten der Quantenphysik beinhaltet.

3.2 Zusammenarbeit mit dem Institut für Philosophie

Die Beteiligung des Institutes für Philosophie gewährleistet eine wissenschaftstheoretisch saubere Darstellung und Diskussion der Versuche. Als Besonderheit soll eine Unterrichtseinheit entwickelt werden, in der der Treffpunkt Quantenmechanik dazu genutzt wird, Philosophiekursen der Oberstufe die Arbeitsweise und Problematik naturwissenschaftlicher Weiterkenntnis am Beispiel des Welle-Teilchen-Dualismus zu erläutern.

Das Institut für Philosophie will in Zusammenarbeit mit der Physikdidaktik ein dreistufiges Programm entwickeln, das die philosophischen Grundlagen der Quantenmechanik aufarbeitet und (im Nutzungstyp I, s.u.) für den Schulunterricht herangezogen werden kann:

1. Stufe: Zunächst wird das Problem-Bewusstsein entfaltet. Dabei geht es um eine wissenschaftstheoretische Reflexion grundlegender logischer, methodologischer, semantischer, ontologischer und epistemologischer Probleme der Physik. Demnach soll die Kunst der richtigen Fragestellung als Ausgangspunkt der Erkenntnis reflektiert werden. Die explizite Auseinandersetzung mit den oftmals nur implizit gelehrten Vorannahmen der Physik wird auch als didaktischer Schwerpunkt dieser Stufe betrachtet.

2. Stufe: Danach wird Begriffs-Bewusstsein geschärft. Hier geht es um die Entfaltung der begrifflichen Schwierigkeiten am Beispiel des Doppelspalt-Experimentes. Demnach ist die Einsicht in die Unangemessenheit einerseits und die Unverzichtbarkeit andererseits begrifflicher Strukturen der klassischen Physik im mikrophysikalischen Bereich zu fördern. Ein didaktisches Anliegen ist es, die Andersartigkeit der Begrifflichkeit der Quantenmechanik an Denkstrukturen anzukoppeln, die im alltäglichen Leben – mehr oder weniger bewusst – genutzt werden.

3. Stufe: Zuletzt wird in komplexeren Experimentiersituationen der eigenständige und adäquate Umgang mit der quantenmechanischen Begrifflichkeit eingeübt. Die didaktische Zielsetzung sieht vor, die Teilnehmer in die Lage zu versetzen, eine stimmige physikalische Argumentation beim Versuchsaufbau, der Durchführung und der Interpretation der Messergebnisse zu konstruieren.

3. Curriculare Anbindung

Das Curriculum des Landes NRW sieht (§2.2.1.5) die Behandlung folgender Themen aus dem Bereich der Quanteneffekte vor:

- a) Lichtelektrischer Effekt und Lichtquantenhypothese
- b) Linienspektren und Energiequantelung des Atoms, Bohr'sches Atommodell
- c) de Broglie-Theorie des Elektrons
- d) Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe in der Quantenphysik
- e) Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation
- f) Quantenobjekte und Messprozesse
- g) Schrödingergleichung und Anwendungen (Wasserstoffatom, Tunneleffekt)
- h) Pauli-Prinzip (Spin, Aufbau des Periodensystems)

Aus dem Bereich §2.2.1.2 Elektrik / Elektrische Schwingungen und Wellen werden u.a. behandelt:

- Elektromagnetische Wellen (Ausbreitung, Hertz'scher Dipol, Maxwell'sche Postulate)
- Ausbreitung von Licht (Beugung, Interferenz, Reflexion, Brechung, Polarisierung)
- Informationsübertragung durch elektro-magnetische Wellen

Die Curricula der Länder sind zumindest in Teilen vergleichbar. Der Treffpunkt Quantenmechanik ist auf eine Anbindung an dieses Curriculum konzipiert. Zugleich soll aber auch die didaktische Fragestellung untersucht werden, inwieweit Schüler innerhalb der Schule tatsächlich Kompetenzen in diesen Bereichen entwickeln um eine Optimierung des universitären Lehrangebots zu erreichen.

3.4 Angebotene Versuche und Begründung der Experimente

Im Treffpunkt Quantenmechanik sollen folgende Versuche angeboten werden:

- [1] Klassische Wellen im Wasser
- [2] Beugung von Laserlicht am Spalt
- [3] Polarisierung des Lichtes (mittels Kalkspat)
- [4] Braunsche Röhre
- [5] Millikan-Versuch
- [6] Schwarzkörperstrahlung und Plancksches Wirkungsquantum
- [7] Bestimmung des Planck'schen Wirkungs-quantums mit dem lichtelektrischen Effekt
- [8] Comptoneffekt
- [9] Spektroskopie und Atommodell
- [10] Franck-Hertz-Versuch
- [11] Elektronenbeugung
- [12] Beugung einzelner Photonen am Doppelspalt
- [13] Mach-Zehnder-Interferometer (Welcher-Weg-Experiment)

Begründung der Auswahl der Experimente:

Der Treffpunkt Quantenmechanik soll Schülerinnen und Schülern die faszinierende Struktur der subatomaren Welt erschließen und die Schlüsselfunktion der Quantenmechanik für die moderne Physik sowie für Ingenieurwissenschaften wie die Elektrotechnik verdeutlichen. Die Experimente sind so ausgewählt, dass sie für die Lernumgebung Universität begeistern und die nicht-klassischen Grundlagen der heutigen Physik erlebbar machen. Um diese Brückenfunktion zu erfüllen, wird an Schulwissen angeknüpft und zu Inhalten des Physikstudiums hingeführt, ohne diese vorwegzunehmen. Dabei wird der Treffpunkt Quantenmechanik so gestaltet, dass er potentielle Studierende der Physik genauso anzieht wie Schülerinnen und Schüler, die zu einem Studium benachbarter Fächer oder der Philosophie tendieren (entsprechendes gilt für die Lehrerfortbildung). Er macht die Denk- und Arbeitsweisen der modernen Physik direkt erfahrbar und wirkt der Abkopplung der Öffentlichkeit von der Wissensbasis unserer technischen Lebenswelt entgegen.

Die Anzahl der anzubietenden Experimente orientiert sich an einer erwarteten Stärke eines Physikkurses von bis zu 30 Personen und dem Wunsch, die Schüler in Zweier- oder Dreiergruppen experimentieren zu lassen. Die Auswahl der Experimente knüpft an das Curriculum des Landes NRW an und zielt darauf, die Besonderheiten der Quantenphysik gegenüber der klassischen Physik erlebbar zu machen. Um ausgehend vom klassischen Wellen- und Teilchenbild systematisch an den „paradoxen“ Welle-Teilchen-Dualismus von Licht und Materie heranzuführen, ist folgende Versuchsreihe erforderlich:

Erster Abschnitt: Mechanische Phänomene

Begründung: Rekapitulation des klassischen Wellen- und Teilchenbildes

Curriculum NRW: elektromagnetische Wellen & klassische Teilchen

Experimente:

(1) Wellen im Wasser

Begründung: Analogie zur Ausbreitung und Interferenz klassischer elektromagnetischer Wellen

Curriculum NRW: mechanische Wellen

Zweiter Abschnitt: klassische Betrachtung des Lichts und subatomarer Teilchen

Begründung: klassische Eigenschaften von Licht und Elektronen

Curriculum NRW: elektromagnetische Wellen & klassische Teilchen

Experimente:

(2) Beugung von Laserlicht am Spalt

Begründung: Wellencharakter von Licht

Curriculum NRW: elektromagnetische Wellen (§2.2.1.2)

(3) Doppelbrechung an Kalkspat

Begründung: Polarisation von Licht

Curriculum NRW: elektromagnetische Wellen (§2.2.1.2)

(4) Versuche mit Braunscher Röhre

Begründung: Teilchencharakter von Elektronen I: Strahlen mit Masse und Ladung

Curriculum NRW: de Broglie Theorie des Elektrons

(5) Millikanversuch

Begründung: Teilchencharakter von Elektronen II: einzelne Ladungsträger

Curriculum NRW: bewegte geladene Teilchen im elektrischen Feld

Dritter Abschnitt: Lichtquantenhypothese

Begründung: Versagen der klassischen Wellentheorie des Lichts

Curriculum NRW: Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe II (§2.2.1.5)

Experimente:

(6) Schwarzkörperstrahlung

Begründung: Versagen der klassischen Strahlungstheorie und Lichtquantenhypothese

Curriculum NRW: Lichtquantenhypothese

(7) Lichtelektrischer Effekt

Begründung: Teilchencharakter des Lichts bei der Lichtabsorption

Curriculum NRW: Lichtelektrischer Effekt

(8) Compton Effekt

Begründung: Energieverlust des Lichtquants durch teilchenartigen Rückstoß

Curriculum NRW: Lichtquantenhypothese

**Vierter Abschnitt:
Lichtquantenhypothese und
Atomstruktur**

Begründung: Versagen der klassischen Atommodelle

Curriculum NRW: Linienspektren und Energiequantelung des Atoms (§2.2.1.5)

Experimente:

(9) Spektroskopie

Begründung: Nachweis der Linienspektren und Rolle der Lichtquantenhypothese im Atommodell

Curriculum NRW: Linienspektren und Bohr'sches Atommodell

(10) Franck-Hertz-Versuch

Begründung: Nachweis der diskreten Energieanregung von Atomen

Curriculum NRW: Energiequantelung des Atoms

Fünfter Abschnitt: Materiewellen

Begründung: Versagen der klassischen Teilchentheorie des Elektrons

Curriculum NRW: Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe II (§2.2.1.5)

Experimente:

(11) Elektronenbeugung

Begründung: Wellenaspekte des Elektrons

Curriculum NRW: de Broglie Theorie des Elektrons

Sechster Abschnitt: Welle-Teilchen-Dualismus

Begründung: nicht-klassischer Charakter von Materie und Licht: Ausbreitung von Wellen & Messung von Teilchen

Curriculum NRW: Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe III (§2.2.1.5)

Experimente:

(12) Doppelspaltexperimente mit einzelnen Photonen

Begründung: Wahrscheinlichkeitsdeutung und Versagen der Wegvorstellung

Curriculum NRW: Quantenobjekte und Messprozess

(13) „Welcher-Weg-Experiment“ mit dem Mach-Zehnder-Interferometer

Begründung: Übergang zwischen Interferenz- und Wegmessung; Zugang zur Quantenoptik im Realexperiment

Curriculum NRW: Quantenobjekte und Messprozess

Die Versuche zum Welle-Teilchen Dualismus (12.-13.) führen direkt an den aktuellen Forschungsstand in der Quantenoptik heran, der die Grundlagen zum Verständnis der Dekohärenz und der

Probleme der Entwicklung eines Quantencomputers liefert.

3.5 Nutzungstypen

Nutzungstyp I: gelegentliche Demonstrationsexperimente

Bei Ereignissen wie dem Tag der offenen Tür der Universität, der Schnupper-Uni, dem Girls-Day etc. sollen am Treffpunkt Quantenmechanik Demonstrationsexperimente durchgeführt werden. Das Alter, die Zielgruppe und die Teilnehmerzahl werden durch den Charakter der Veranstaltung bestimmt.

Von Schulen wurde angeregt, den Treffpunkt Quantenmechanik auch als Ziel von Tagesexkursionen für Schulklassen (30 Personen) der Mittelstufe zu öffnen. Das Alter der Jugendlichen liegt hier zwischen 13 und 15.

Auch für Philosophiekurse sind eintägige Demonstrationsexperimente geplant.

Nutzungstyp II: systematisch vorbereitete Schülerexperimente

Zur Durchführung von Versuchen, die in der Schule vor- und nachbereitet werden, soll der Treffpunkt Quantenmechanik Physikkursen der Jahrgangsstufe 12 an drei nicht notwendig aufeinanderfolgenden Tagen zur Verfügung stehen. Die Kursstärke beträgt in der Regel zwischen 20 und 30 Personen. Das Alter liegt bei 18 Jahren.

Bei der Herbstakademie soll der Treffpunkt Quantenmechanik Gruppen von Schülern zur Verfügung stehen. Die Vorbereitung erfolgt hier an der Universität. Auszugehen ist von etwa 30 Teilnehmern im Alter zwischen 16 und 19 Jahren und einer Dauer des Praktikums von 2 Wochen.

Nutzungstyp III: eigenständige Schülerexperimente

Einzelne Schüler der Oberstufe sollen die Möglichkeit bekommen, am Treffpunkt Quantenmechanik Versuche

durchzuführen. Zielgruppe sind hier Schüler, die Versuche im Rahmen eines Projektpraktikums oder einer Facharbeit im Rahmen der schulischen Anforderungen durchführen möchten und Schüler, die aus Interesse das Praktikum in den Schulferien absolvieren möchten. Von schulischer Seite wurde angeregt, das Praktikum auch als Beitrag zur Hochbegabtenförderung nutzen zu können. Wir rechnen mit einer begrenzten Zahl von Jugendlichen im Alter zwischen 17 und 19 Jahren, denen das Praktikum dreimal im Jahr jeweils über einen Zeitraum von 2 Wochen zur Verfügung gestellt wird.

Nutzungstyp IV: Lehrerfortbildung

Natürlich steht der Treffpunkt Quantenmechanik Lehrern, insbesondere der am Nutzungstyp II teilnehmenden Schulen, zur Unterrichtsvorbereitung und Weiterbildung offen. In Vorbereitung auf Einführung des Abiturs nach 12 Schuljahren können Vorschläge für ein landesweit gültiges Curriculum für das Zentralabitur erarbeitet werden. Geplant ist auch die Öffnung der interdisziplinären Lehrveranstaltungen, die die Fachbereiche Physik und Philosophie regelmäßig als Kompaktseminare nach Ende des Wintersemesters durchführen, für die Lehrerfortbildung sowie die Durchführung spezieller Lehrveranstaltungen durch die Physikdidaktik.

3.6 Evaluation

Der Treffpunkt Quantenmechanik kooperiert für die Zwecke der Evaluation mit dem Projekt Lernort Labor des Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften in Kiel. Diese Kooperation wurde schon in der Planungsphase initiiert. Die am IPN entwickelten Instrumente werden nach den Maßgaben des IPN regelmäßig zur Erfolgskontrolle eingesetzt. Die Ergebnisse werden zur iterativen Verbesserung des Schülerpraktikums verwendet.

4. Zusammenfassung

Im Treffpunkt Quantenmechanik trifft klassische Physik auf moderne Physik,

Schule auf Universität, Forschung auf Vermittlung, Physik auf Wissenschaftstheorie und Schüler treffen auf Wissenschaftler. Ausgehend vom schulischen Curriculum wird mittels 13 Experimenten zu den Inhalten des Physikstudiums hingeführt, ohne diese vorwegzunehmen. Die Schüler werden in die Lage versetzt eine stimmige physikalische Argumentation beim Versuchsaufbau, der Durchführung und der Interpretation der Messergebnisse zu konstruieren und werden so an die philosophischen Implikationen der Quantenmechanik herangeführt.

Der Treffpunkt Quantenmechanik wird dabei zugleich ein Erprobungsfeld für die Physikdidaktik sein mit dem Ziel Lehrmethoden zu verbessern und die Verbindung von schulischen und universitären Curricula zu optimieren.

5. Literatur

- [1] A. Berg u. a., *Einführung in die Quantenphysik - Ein Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse*, Pädagogisches Zentrum Berlin 1989
- [2] A. Brachner, R. Fichtner, *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*, Schroedel, Hannover, 1977
- [3] A. Brachner, R. Fichtner, *Quantenmechanik*, Schroedel, Hannover (1980)
- [4] Dähnhard, Dorothee: Die Initiative Lernort Labor in Maxtone-Küchemeister, Jorg & Dähnhard, Dorothee (Hrsg.): *Genlabor und Schule*, BMBF (2005), S. 6
- [5] Katrin Engelen und Manfred Euler: *Forschen statt Pauken*, Physik Journal 3(2004) Nr. 11
- [6] M. Euler, Proc. Int. School of Physics „*Enrico Fermi*“ Course CLVI, Varenna, SIF, s. 175 (2004)
- [7] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III*, (Addison-Wesley, Reading 1966)
- [8] H. Fischler, Die Berliner Konzeption einer „Einführung in die Quantenmechanik“: Didaktische Grundsätze und inhaltliche Details in: H.

Fischler (Hrsg.) *Quantenphysik in der Schule* IPN Kiel (1992), S.245

[9] H. Fischler, M. Lichtfeld, Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik, *Physik in der Schule*, 32, 276 (1994)

[10] Guderian, Pascal; Priemer, Burkhard; Schön, Lutz-Helmut | Angenommen am: 28. Dez. 2006 | Seiten: 142 bis 149, *PhyDid: In den Unterricht eingebunden Schülerlaborbesuche und deren Einfluss auf das aktuelle Interesse an Physik*

[11] W. Harlen, *Effektive teaching of science – a review of research*, SCRE, Ednburgh (1999)

[12] D. Hodson, *Studies in Science Education*, 22, 85 (1993)

[13] Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut: *Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik* (2000)

[14] Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut: *Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik* überarbeitet von Bernadette Schorn (2006)

[15] H. Niedderer, *Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell*, in: H. Fischler (Hrsg.) *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel (1992), S. 88

[16] *Quantensprung* (2007) Homepage: http://www.gkss.de/pages.php?page=j_quantensprung.html&pagelanguage=d&language=d&version=g

[17] Thaller, Bernd: *Visual Quantum Mechanics*, Springer (2000)

[18] Thaller, Bernd: *Advanced Visual Quantum Mechanics*, Springer (2004)

Danksagung: Bei der Planung und Realisierung des Treffpunkts Quantenmechanik sind neben den Autoren beteiligt: Frau Dr. M. Horstendahl vom Stadtgymnasium Dortmund, Frau Borowka und Herr Braun von der Universität Dortmund sowie eine Anzahl von Lehrern der Schulen der Region Dortmund denen wir hiermit ganz herzlich danken. Der Treffpunkt Quantenmechanik wird

gefördert im Rahmen des Programms
NATWORKING.