

ZUM STAND DER FACHDIDAKTISCHEN DISKUSSION ÜBER DIE QUANTENPHYSIK IN DEUTSCHLAND

KUANTUM FİZİĞİ ALAN ÖĞRETİMİ KONUSUNDA ALMANYA' DA YAPILAN TARTIŞMALARIN SON DURUMU

Ahmet İlhan ŞEN*

ABSTRACT: How to teach quantum physics as part of the modern physics in secondary schools has been discussed for a long time in Germany. The results of these discussions are expected to be very helpful for researches started recently in Turkey. Important suggestions made on teaching quantum physics have been discussed in this work. The results are giving an idea about the quantum physics lessons in physics education literature in German.

KEY WORDS: *Science education, modern physics in secondary schools, quantum physics lessons in Germany,*

ÖZET: Uzun süredir Almanya'da; orta öğrenimde kuantum fiziğinin, modern fiziğin bir parçası olarak nasıl öğretilmesi gerektiği tartışılmaktadır. Bu tartışma sonuçlarının, Türkiye'de henüz bu alanda yeni başlayan araştırmalar için faydalı olacağı beklenmektedir. Bu çalışmada, Almanya'da kuantum fiziğinin öğretilmesi üzerine sunulan önemli öneriler incelenmiştir. Sonuçlar, Almanca fizik eğitimi literatüründeki kuantum fiziği dersleri hakkında bir fikir vermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: *Fen eğitimi, orta öğrenimde modern fizik, Almanya'da kuantum fiziği dersleri*

1. EINFÜHRUNG

Seit einigen Jahren wird im Rahmen des "National Education Development Project" (Milli Eğitimi Geliştirme Projesi), unter der Zusammenarbeit von YÖK (Council of Higher Education), British Council und der Weltbank, an der Universität München am Lehrstuhl für Didaktik der Physik ein neuer Lehrgang für türkische Schulen entwickelt. Als Vorarbeit dazu ist eine ausführliche deutsche Literaturrezeption durchgeführt worden, um zu erkennen, welche Konzepte oder Konzeptionen bei der Entwick-

lung eines an türkischen Schulen erfolgreich anwendbaren Lehrgangs einen wichtigen Beitrag leisten können.

Eine Durchsicht der fachdidaktischen Literatur in der Bundesrepublik Deutschland zeigt, dass die Quantenphysik schon lange als Thema in der Schule betrachtet wird. Schon in den Schulbüchern, die vor 1945 erschienen sind, gibt es Kapitel über Quantenphysik, die sich aber im wesentlichen auf die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes (also des Photonenkonzepts) (siehe z.B.[1,2]) und das Bohrsche Atommodell beschränken. Fachdidaktische Diskussionen und Kritiken haben inzwischen zu einer Reihe von verschiedenen Ansätzen mit konkreten Unterrichtsvorschlägen geführt.

Im folgenden sollen einige Beispiele für verschiedene Standpunkte der Unterrichtsvorschläge über die Quantenphysik in Deutschland vorgestellt und damit vor allem Anregungen für eine Weiterführung der didaktischen Diskussionen in der Türkei unter Berücksichtigung fachmethodischer Überlegungen in Deutschland gegeben werden.

Außerdem sollten die Physiklehrerinnen und -lehrer Kenntnis über Alternativen und die zugehörigen didaktischen bzw. methodischen Begründungen haben, damit sie entsprechend ihrer spezifischen Situation (z.B. Klasse, soziales Umfeld usw.) eigene Schwerpunkte im Unterricht einsetzen können.

* Öğr. Gör. Dr. H.Ü. Eğitim Fakültesi, Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanlar Bölümü, Fizik Eğitimi Anabilim Dalı
ailhan@hacettepe.edu.tr

2. Wichtigste Ansätze für den Quantenphysikunterricht in Deutschland

2.1 Der "Bremer" Ansatz

Die Kernpunkte der von Niedderer und seiner Arbeitsgruppe in Bremen entwickelten Konzeption [3-8] bestehen im wesentlichen aus den folgenden Leitideen [5,S.319-320] :

a) Von Bohr zu Schrödinger

Im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe wird das Bohrsche Atommodell noch zugrundegelegt. Demgegenüber wird in dieser Konzeption das Bohrsche Atommodell nur so weit berücksichtigt, wie es in einem schülerorientierten Unterricht von Schülerinnen und Schülern selbst eingebracht wird. Das Ziel des Kurses ist ein Atommodell nach Schrödinger, in dem die Existenz von Zuständen mit diskreten Energieniveaus eine Begründung findet.

b) Reduzierung des mathematischen Aufwandes mit Hilfe des Computers

Sowohl für das quantenphysikalische Atommodell als auch für die Interpretation der Zustandsfunktion stationärer Zustände werden bei Niedderer "anschauliche Modelle" verwendet, die mit Hilfe der Analogie der klassischen stehenden Welle präsentiert werden. Dabei wird der Computer als Hilfsmittel zur Veranschaulichung der Ψ -Funktion einschließlich ihrer Randbedingungen verwendet. Mit dem Computer (Modellbildungsprogramm "STELLA") werden dann konkrete Rechnungen zur Bestimmung der Eigenwerte und Eigenfunktionen durchgeführt.

c) Erschließung von Anwendungen

Der inhaltliche Schwerpunkt wird zunehmend auf Anwendungen, insbesondere in der Atomphysik, die über das Wasserstoffatom hinausgeht, verlagert. Die Interpretationsdiskussion spielt bei diesem Konzept eine untergeordnete Rolle.

Um die Bahnbewegung im Atom zu vermeiden, wird der Begriff "Orbitale" benutzt. Zur Interpretation der Orbitale werden sowohl die

Lokalisationswahrscheinlichkeit als auch die Ladungswolkendeutung angeboten.

In Bezug auf die Anwendungen werden die Zustandsfunktionen als mathematische Beschreibungen der räumlichen "Gestalt" von Elektronen interpretiert.

Eine der großen Debatten auf dem Gebiet "Fachdidaktik" dreht sich darum, in wie weit und auf welche Weise man die fachlichen Gegenstände in der Schule elementarisieren und *vermitteln* kann. Besonders heftig wird dies bezüglich über Quantenphysik diskutiert. Im Vergleich zur klassischen Physik geschehen die Ereignisse in der Quantenphysik nicht vor unseren Augen, was das "Anschauungsproblem" aufwirft.

Besonders in der Frage eines geeigneten "Modells", das die Ereignisse in der Quantenphysik veranschaulichen soll, gehen die Positionen in den verschiedenen Konzeptionen weit auseinander. Wiesner [9,S.149-150] und Fischer [10,S.245] betonen die Gefahr, durch Verwendung klassisch-anschaulicher Analogien quanten-mechanisch falsche Vorstellungen zu fördern.

Wiesner weist z.B. in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die klassisch gültige Gleichung,

$$p = \sqrt{2m(W_n - W_{\text{pot}}(r))},$$

über die Niedderer die Schrödinger-Gleichung herleitet, falsch sein muss, weil sonst in der Quantenphysik gleichzeitig W_{kin} (W_n (Gesamtenergie) - W_{pot} (potentielle Energie)) und W_{pot} scharfe Werte besitzen, was aber der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation widerspricht. Für die Schülerinnen und Schüler muss der Eindruck entstehen, dass Ort und Impuls (bzw. kinetische und potentielle Energie) gleichzeitig vorhandene Eigenschaften sind, wie man es in der klassischen Mechanik gewohnt ist. Das klassische Denken wird also im Rahmen dieses Ansatzes noch verstärkt.

Noch problematischer ist eine Interpretation

der Wahrscheinlichkeitsdichte $|\Psi|^2$ als Ladungsdichte bzw. Ladungswolke, wobei die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\Psi|^2$ mit der Ladung des Elektrons multipliziert und dieser Wert als Ladungsdichte bzw. Ladungswolke interpretiert wird.

Diese Annahme von Niederer stößt aber auf fachliche Gegenargumente: z.B. die elektromagnetische Selbstwechselwirkung eines Einteilchensystems.

Ein weiteres Gegenargument, das von Petri erwähnt wurde, besagt, dass die Zustandsvektoren eines Mehrteilchen-Quantensystems im Hilbertraum prinzipiell nicht durch einen Zustand im dreidimensionalen physikalischen Raum beschrieben werden können [11,S,22] .

2. 2 Der Ansatz von Bader

Dem Ansatz, der auf der Wegintegralmethode von Feynman beruht und von ihm selbst [12] popularisiert worden ist, liegt im wesentlichen die Addition rotierender Pfeile (auch Zeiger genannt) zugrunde, um die Verwendung komplexer Zahlen zu umgehen. Feynman ordnete jedem möglichen Pfad des unteilbaren Quantenobjekts (Photon, Elektron) einen rotierenden Pfeil (genauer gesagt: eine komplexe Zahl, deren Phase und damit auch Richtung in der komplexen Ebene sich ändert) zu. Für ihn liegt der Grund für die Interferenz darin, dass für das Quantenobjekt verschiedene Pfade (verschiedene Möglichkeiten) vorhanden sind.

In der ersten Stufe von Bader's Konzept wird das Huygensche Prinzip durch die Addition rotierender Pfeile (komplexer Wahrscheinlichkeitsamplituden) in der klassischen Optik quantitativ erläutert. Diese Pfeile stellen Schwingungen und Wellen mit komplexen Funktionen im Sinne der Kirchhoffschen Beugungstheorie dar, die vom Computer aufaddiert werden. Die Umdeutung des so präzisierten Huygenschen Prinzips von klassischen Wellen auf "Quantenobjekte" stellt in der zweiten Stufe den Schwerpunkt dar.

Die "Bahnen" in der Abb.1 stellen Rechen-

pfade der Pfadintegralmethode dar. Zeiger (oben) drehen sich als λ -Zähler auf der Strecke λ einmal. Im Ziel Z zeitgleich auftreffende Zeiger werden zur Resultierenden A_T addiert. Das Quadrat A_T^2 gibt die Wahrscheinlichkeit an, ein Quantenobjekt an der betreffenden Stelle zu finden.

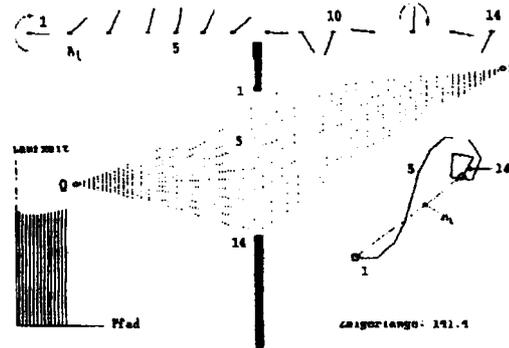


Abb. 1: Die "möglichen Wege der Wellenerregung" von Q über die Spaltpunkte werden umgedeutet in "mögliche Wege des Quantenobjekts". Die zu jedem Weg 1-14 gehörenden Zeiger (obere Reihe) werden zur Pfeilspirale addiert (Abb. aus [13], S. 291).

Die Zeigeraddition demonstriert das fundamentale Superpositionsprinzip für alle (nicht unterscheidbaren) Möglichkeiten. Die Möglichkeiten sollen sich nämlich als eine neuartige und wesentliche Kategorie im Quantenbereich erweisen (Quantenunbestimmtheiten).

Der Übergang von Wellen zu Quanten zieht die Umdeutung von Intensitäten in Wahrscheinlichkeitsaussagen für Einzelereignisse (Lokalisation eines Quantenobjekts) mit sich. Dabei interferieren nicht klassische Wellen, also Intensitäten oder gar Photonen(-anzahlen), sondern nicht unterscheidbare Möglichkeiten für Einzelereignisse (Wahrscheinlichkeitsamplituden). In der dritten Stufe des Ansatzes werden die sogenannten fortschreitenden Materie-"wellen" in Übereinstimmung mit der zeitabhängigen Schrödingergleichung mittels rotierender Zeiger beschrieben und dann zu "Wellen"paketen superponiert.

Schließlich wird in der letzten Stufe die zeitunabhängige Schrödingergleichung anhand

einiger Beispiele (z.B. quantitative Lösung der Schrödinger-Gleichung an einer Potentialschleife) behandelt.

In den meisten didaktischen Ansätzen geht man davon aus, dass man Elektronen oder Photonen als Quantenobjekte bezeichnen sollte, die weder Teilchen noch Wellen sind (siehe z.B. 2.3 Das "Berliner" Konzept). Bader selbst ist auch dieser Meinung. Aber die Auseinandersetzung darüber, dass die Quantenobjekte "weder - noch" sind, wird im Lehrtext nicht ausführlich genug behandelt. Das kann zur Folge haben, dass sich die Schülerinnen und Schüler am Ende des Quantenphysikunterrichts nur an die den Quantenobjekten zugeschriebenen Pfeile erinnern.

Außerdem ist es immer noch irreführend, dass die "Bahnen" in der Abb.1 nur Rechenpfade für Feynman's Pfad-Integralmethode darstellen, da man an vielen Stellen des Konzepts schreibt, dass sie "mögliche Wege des Quantenobjekts" sein sollen. Es scheint daher für die Schüler(innen) so zu sein, dass man in der Quantenphysik nur nicht dazu imstande ist, zu wissen, auf welchem Weg (Bahn) ein Quantenobjekt von der Quelle aus das Ziel erreicht.

Schließlich ist noch zu sagen, dass man die Pfeiladditionsmethode in der Atomphysik nicht weiter anwenden kann, da sich in ihr gebundene Systeme nicht ohne weiteres behandeln lassen.

2.3 Das "Berliner" Konzept

Für diesen Ansatz ist es entscheidend, von Anfang an so weit wie möglich auf klassische Vorstellungen und Analogien zu verzichten.

Die Struktur des Berliner Konzepts ist folgendermaßen zu beschreiben:

Der Kurs beginnt die Quantenphysik mit 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 Wellenvorstellung zu verknüpfen."* [14,S.100] Über den Versuch "Elektronenbeugungsröhre" kommt man auf die de Broglie-Beziehung.

Über den Versuch "Elektronenbeugungsröhre" kommt man auf die de Broglie-Beziehung.

Der Doppelspaltversuch mit Elektronen soll deren neuartiges Verhalten aufzeigen. Elektronen werden dann als Quantenobjekte bezeichnet, deren Verhalten mit den Begriffen der klassischen Physik nicht mehr beschrieben werden kann. In dem nächsten Schritt wird die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation diskutiert, die besagt, dass es keine Gesamtheit von Quantenobjekten (z.B. Elektronen) gibt, deren Ortstreue Δx und deren Impulstreue Δp_x gleichzeitig beliebig klein sein können. Vielmehr setzt die Relation $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$ der gleichzeitigen Verringerung von Δx und Δp_x eine prinzipielle Grenze.

Um die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons und die Definition der Energiequantelung zu veranschaulichen, wird der Potentialtopf mit undurchdringlichen Wänden mit Hilfe der Analogie der stehenden Wellen dargestellt. Anschließend geht man über den dreidimensionalen Potentialtopf zur Energiequantelung im H-Atom über. Dazu werden die Energien W_n , für den Potentialtopf berechnet, und anschließend die potentielle Energie W_{pot} im Coulombfeld addiert. Daraus ergeben sich die gequantelten Energiezustände für das H-Atom.

Anschließend behandelt man den Franck-Hertz-Versuch, um die Energiequantelung im Atom zu bestätigen.

Im vorletzten Schritt wird das "Photon" als Quantenobjekt charakterisiert. Die Erkenntnis, dass ruhemasselose Quantenobjekte dennoch einen Impuls haben können, wird durch den Compton-Effekt vermittelt.

Am Ende des Kurses weist man auf die Deutungsprobleme der Quantentheorie hin. Die Schülerinnen und Schüler sollen dabei die wichtigsten erkenntnistheoretischen Fragestellungen kennenlernen, die bei der Entwicklung der Quantenmechanik aufgetreten sind.

In einer Nebenbemerkung weisen die Autoren darauf hin, dass es gegen den Ansatz, dass die kinetische Energie eines klassischen Teilchens, $W = p^2 / (2m)$, auch für Elektronen im Potentialtopf gilt, einen fachlichen Einwand gibt: *"Energie und Impuls von Elektronen im Potentialtopf erscheinen in dieser elementaren Rechnung als gleichzeitig scharfe Werte, was wegen der Nichtvertauschbarkeit von Impuls- und Energieoperator im allgemeinen nicht zulässig ist."* [15, S.39] Es ist merkwürdig, dass sie trotz dieser Bemerkung die Herleitung der Energieniveaus eines Elektrons im Potentialtopf über diese Formel weiterführen.

Daneben ist der Übergang vom Potentialtopf zum Wasserstoffatom unglücklich, bei dem die Berliner Gruppe davon ausgeht, dass die Potentialtopfzustände Eigenzustände der kinetischen Energie sind. Dies ist aber nicht richtig: Das Spektrum der möglichen Messwerte der kinetischen Energie für gebundene Zustände im Potentialtopf kann man berechnen, indem man die Eigenfunktionen der kinetischen Energie bestimmt und das Skalarprodukt mit der Zustandsfunktion bildet. Dann sieht man, dass die kinetische Energie für die verschiedenen n -Werte keinesfalls nur den Wert $E_n = h^2 n^2 / (8mL^2)$ (siehe Pfeile in Abb. 2) annehmen kann, sondern im Gegenteil ein kontinuierliches Spektrum besitzt.

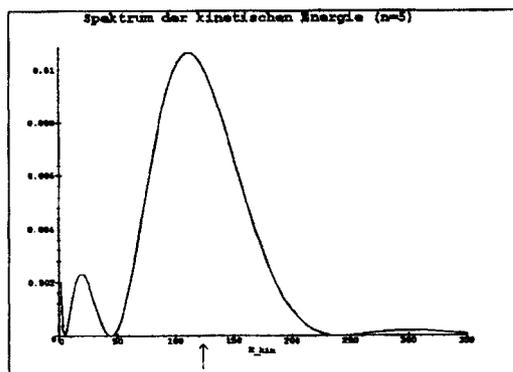


Abb. 2: Spektrum der kinetischen Energie für den Potentialtopf-Zustand $n = 5$. Energien sind in Einheiten von $h^2/(2\pi mL)^2$ aufgetragen (Bild aus [16, S.85-86]).

Das bedeutet, dass die für den Potentialtopf berechneten Energieeigenwerte $E_n = h^2 n^2 / (8mL^2)$ keinesfalls die möglichen Messwerte für die kinetischen Energien sein können, sondern die unter Berücksichtigung des Potentials berechneten Gesamtenergien. Von daher kann die Gesamtenergie des Wasserstoffatoms quantenmechanisch nicht als Summe der "angeblichen" kinetischen Energie, die im dreidimensionalen Potentialtopf für ein Elektron abgeschätzt wird, und der potentiellen (Coulomb-) Energie geschrieben werden, wie im Berliner Ansatz verwendet.

3. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die bisher kurz dargestellten Konzeptionen sind einige Vorschläge für den Quantenphysikunterricht in Deutschland. Sie unterscheiden sich voneinander im Wesentlichen in den zu erreichenden Zielen und den damit zusammenhängenden Schwerpunkten des Unterrichts. Es ist aber selbstverständlich, dass es keine endgültige bzw. "richtige" Antwort auf die Frage nach den Zielen und Methoden des Quantenphysikunterrichts gibt.

Bei der Entwicklung des am Anfang angesprochenen Lehrgangs für türkische Schulen haben die "Münchener" Konzeption, die im Zusammenhang mit der neuen Konzeption für türkische Schule an einer anderen Stelle dargestellt wird, und das "Berliner" Konzept einen großen Beitrag geleistet. Dabei waren die folgenden Punkte unter anderem von großer Bedeutung:

- Die neu entwickelte Konzeption sollte unter realistischen Umständen der türkischen Schulen anwendbar und realisierbar sein.
- Sie sollte weiterhin zeitgemäß sein und die möglichen Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler berücksichtigen, die wenigstens in Deutschland bisher festgestellt worden sind.
- Die Experimente, die zur Darstellung der

quantenmechanischen Phänomene dienen, sollten mit anderen Unterrichtsmaterialien unterstützt werden, da sie mangels Versuchsanordnungen in meisten türkischen Schulen nicht zur Verfügung stehen.

In einem folgenden Aufsatz wird der neue Lehrgang, der bisher zweimal an türkischen Schulen erprobt wurde, ausführlich vorgestellt und sein Erfolg bezüglich der Lernleistung und der Einstellungen im Einzelnen untersucht.

LITERATUR

- [1] Hahn, K. "Methodik des physikalischen Unterrichts", Leipzig, (1927).
- [2] Rosenberg, L. "Lehrbuch der Physik für die höheren Schulen", Berlin/Leipzig, (1938).
- [3] Niedderer, H. "Mechanische Analogieexperimente für Wellenfunktion in verschiedenen Potentialtöpfen". **Ergänzte Fassung des im Vortragsband des FA Didaktik der DPG abgedruckten Beitrages**, Gießen, 516-524, (1983).
- [4] Schecker, H.; Bethge, Th. "Computergestützte Modellbildung im Physikunterricht", *physica didactica*, 17: 51-59, (1990).
- [5] Niedderer, H. "Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell", **Deutsche Physikalische Gesellschaft Fachverband Didaktik (Hrsg.): Didaktik der Physik: Vorträge-Physikertagung**, Gießen, 319-330 (1990).
- [6] Niedderer, H.; Cassens, H.; Petri, J. "Anwendungsorientierte Atomphysik in der S II", *Physik in der Schule*, 32: 339-340, (1994).
- [7] Niedderer, H.; Deylitz, S. "**Atome, Moleküle und Festkörper**", Institut für Didaktik der Physik Universität, Bremen (1997).
- [8] Deylitz, S.; Niedderer, H. "Mit Erwin Schrödinger im Leistungskurs", **Zur Didaktik der Physik und Chemie**, Potsdam, 322-324 (1997).
- [9] Wiesner, H. "**Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe**", Westport Verlag, Essen (1989).
- [10] Fischler, H. "Die Berliner Konzeption einer "Einführung in die Quantenphysik": Didaktische Grundsätze und inhaltliche Details", **Quantenphysik in der Schule**, IPN, Kiel, 245-252 (1992).
- [11] Petri, J. "**Der Lernpfad eines Schülers in der Atomphysik - Eine Fallstudie in der Sekundarstufe II -**", Verlag Mainz, Aachen (1996).
- [12] Feynman, R. "**QED**", Piper, München (1988).
- [13] Bader, F. "Feynmans Pfeiladdition oder Dualismus Welle - Teilchen?", *Physik in der Schule*, 33: 290-295, (1995).
- [14] Fischler, H. "Quantenphysik in der Schule: Anschaulich oder richtig?", *Physik in der Schule*, 30: S. 98-102, (1992).
- [15] Berg, A.; Fischler, H.; Lichtfeldt, M.; Nitzsche, M.; Richter, B.; Walther, F. "**Einführung in die Quantenphysik. Ein Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse**", Pädagogisches Zentrum, Berlin, (1989).
- [16] Berger, R.; Müller, R.; Wiesner, H. "Der Potentialtopf als Illustration des quantenmechanischen Eigenschaftsbegriffs", *Physik in der Schule*, 36:84-87, (1998).