

Die Quantenphysik

in der Sekundarstufe I

B. Schorn u. H. Wiesner

1 | Einleitung

Die Beschäftigung mit Teilgebieten der Modernen Physik stößt bei Schülerinnen und Schülern auf großes Interesse und gibt ihnen einen Einblick in die physikalischen Grundlagen aktueller Forschung. Mit der Umstellung auf das achtjährige Gymnasium und dem Beibehalten der Möglichkeit, Physik in der Oberstufe abwählen zu können, ergibt sich die Notwendigkeit, schon für die 10. Jahrgangsstufe eine Einführung in wesentliche Grundideen der Quantenphysik vorzusehen. Die Auseinandersetzung mit einer andersartigen Physik als der Klassischen Physik und die Erfahrung, dass die Physik nicht zu allen Phänomenen eine anschauliche Erklärung liefern kann, sowie dass man beim Arbeiten mit Quantenobjekten auf verblüffende Erscheinungen stößt, stellt aber auch einen großen Reiz für die Lernenden dar. Zitate von berühmten Physikern, wie z. B. *Niels Bohr*, *Richard Feynman* und *Daniel Greenberger*, die sich intensiv mit der Quantenphysik beschäftigt haben, spiegeln die Schwierigkeit und die erstaunlichen Merkwürdigkeiten, die diese Physik mit sich bringt, wider:

- „Wer von der Quantentheorie nicht schockiert ist, der hat sie nicht verstanden.“ (*Niels Bohr*)
- „... ich denke, ich kann davon ausgehen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.“ (*Richard Feynman*)
- „Einstein sagte, die Welt kann nicht so verrückt sein. Heute wissen wir, die Welt ist so verrückt.“ (*Daniel Greenberger*)

In den Lehrplänen des achtjährigen Gymnasiums in Bayern ist eine Einführung in die Quantenphysik in der 10. Klasse vorgesehen. Diese Situation stellt eine neue und große Aufgabe dar und erfordert einen völlig neuen Zugang zur Quantenphysik, der in dieser Jahrgangsstufe lediglich auf einem rein qualitativen Niveau möglich ist. Im Folgenden wird ein Überblick über eine Auswahl von Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Quantenphysik im deutschsprachigen Raum gegeben (Die ausführlichste

Zusammenstellung der Forschungsergebnisse bis zum Jahre 2003 aus Deutschland als auch anderen Ländern hat *Müller* [1] gegeben). Im Anschluss daran wird das Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe I [2] vorgestellt, das auf der Grundlage der Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten und dem Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (siehe Beitrag von *Müller* in diesem Heft [3]) entstanden ist.

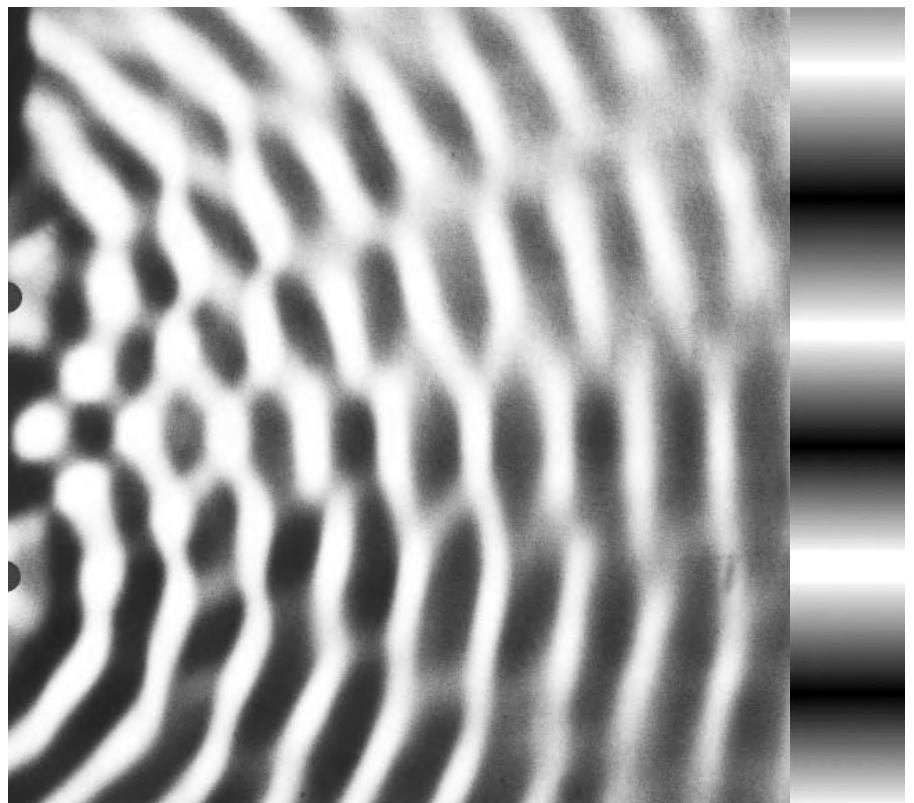
2 | Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

Das Einbeziehen von Vorstellungen und Lernschwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern (bzw. Studierender) ist eine der wichtigsten Komponenten in der Vorbereitung und Durchführung von Unterricht an der Schule (bzw. an der Universität) und die Berücksichtigung der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten ist eine notwendige

Voraussetzung für eine erfolgreiche Unterrichtsgestaltung (siehe die Einleitung in dieses Heft). Die vorunterrichtlichen Vorstellungen sind im Allgemeinen durch Alltagserfahrungen und Medien geprägt – aber auch durch früheren Unterricht – und stehen nicht selten im Widerspruch zu den zu erlernenden Inhalten. Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten sowohl zu Themen der Klassischen als auch der Modernen Physik haben gezeigt, dass die Lernenden die Vorstellungen und Ansätze, die sie vor dem Unterricht besessen haben, teilweise nur schwer oder auch gar nicht überwinden.

Die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern im Bereich der Atom- und Quantenphysik in der Mittelstufe (8. bis 10. Klasse) sind zu Beginn der 8. Klasse größtenteils durch populärwissenschaftliche Informationen über Medien wie z. B. Zeitschriften und Fernsehen und im Folgenden durch den Physik- und Chemieunterricht geprägt [4, 5, 6, 7].

Abb. 1: Ausschnitt aus dem Interferenzmuster



2.1 Vorstellungen zum Aufbau der Atome und zum Teilchenmodell

Die Studie von *Knote* [4] zeigte, dass fast 80% der befragten 13- bis 15-jährigen Schülerinnen und Schüler zu Beginn der 8. Klasse mit dem Atombegriff die Atombombe, nur wenige das Atom als kleinstem Teilchen assoziieren oder etwa den Begriff „Elementarteilchen“ nennen. Im Laufe der Jahrgangsstufen 8 bis 10 verändert sich dieses Vorwissen der Schülerinnen und Schüler jedoch dahingehend, dass etwa 60% das Kern-Hülle-Modell und die Existenz von Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen erlernen. Dass es sich bei dem Kern-Hülle-Modell jedoch um eine Modellvorstellung handelt, erfassen nach *Knote* hingegen maximal 10% der Schülerinnen und Schüler der 10. Klasse. Die Untersuchungen von *Fischler*, *Lichtfeldt* und *Peuckert* [5, 6, 7] zeigen wiederum deutlich, dass die Schülerinnen und Schüler vorunterrichtliche Vorstellungen vor dem Physik- und Chemieunterricht besitzen. Diese sind von der Auffassung, dass Körper aus kleinen Bausteinen bestehen, die die gleichen Eigenschaften wie die makroskopischen Körper besitzen, der Kontinuumsvorstellung und dem Bohr'schen Atommodell geprägt. Auch nach dem Unterricht in der Mittelstufe in den Fächern Physik und Chemie konnten die Kontinuumsvorstellung und die Vorstellung von Elektronen, die auf Bahnen um den Kern kreisen, nicht überwunden werden. Wie auch bei *Knote* zeigten die Untersuchungen, dass der Modellcharakter beispielsweise des Bohr'schen Atommodells zur Beschreibung physikalischer Phänomene nicht erkannt wird und die Unterscheidung zwischen Modell- und Phänomenebene nicht gelingt. Die Schülerinnen und Schüler gehen davon aus, dass die Atome in der Realität dem Bohr'schen Atommodell entsprechen und sehen somit das Modell als Wirklichkeit an.

2.2 Quantenobjekte und Bahnbegriff der Klassischen Mechanik

Aus den Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern im Bereich der Atom- und Quantenphysik in der Oberstufe lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen¹: Nach dem traditionellen Quantenphysikunterricht stellte *Bayer* [8] in seiner Untersuchung über die Atomvorstellungen von Schülerinnen und Schülern fest, dass der Bahnbegriff entweder nicht überwunden oder als Vorstellung wieder

neu aufgegriffen wurde und der Teilchenaspekt des Elektrons eine vordergründige Rolle spielt. Auch die Ergebnisse von *Borrmann* [9] zeigen deutlich, dass die Teilchenvorstellung des Elektrons in Form eines kugelförmigen Objekts mit den Eigenschaften Masse, Geschwindigkeit und Bahnkurve auch nach der Behandlung und Diskussion eines Beugungsexperimentes erhalten bleibt. In der Untersuchung von *Bethge* [10, 11] wurden mehrere Aspekte von Schülervorstellungen zur Quantenphysik erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Viertel der Befragten die klassische Vorstellung einer Bahn nach dem Unterricht ablegten und bei den anderen Probanden wiederum der klassische Bahnbegriff in der Quantenphysik nicht aufgegeben wurde.

2.3 Stabilität von Atomen

Auch die Erklärung zur Stabilität von Atomen gründet auf der Vorstellung des Bohr'schen Atommodells und wird von Seiten der Schülerinnen und Schüler z. B. durch den Gleichgewichtszustand zwischen der Coulomb- und der Zentrifugalkraft erklärt. Das Elektronenwolkenmodell aus dem Unterricht hinterließ keine nachhaltige Wirkung.

2.4 Wesentliche Merkmale klassischer Objekte und Quantenobjekte

Weitere Untersuchungen zu Schülervorstellungen wurden von *Wiesner* [12, 13] (und von *Müller* bei Lehramtsstudierenden [1] mit vergleichbaren Ergebnissen wie bei Leistungskurschülern) durchgeführt: Die Eigenschaft „Ort“ wird lediglich von 15% der Schülerinnen und Schülern als eine wesentliche Größe klassischer Objekte angesehen im Vergleich zu den Größen Masse und Gewicht (85%), Größe, Volumen, Gestalt und Form (43%), Geschwindigkeit und Bewegung (38%), Impuls (27%), Dichte (15%) und Energie (12%). Auf die Frage nach den wesentlichen physikalischen Größen von Quantenobjekten ergab sich folgendes Antwortspektrum: Masse, Ladung sowie Geschwindigkeit und Impuls (37%), Energie (26%), Spin (22%), Energiestufen/quanten (15%), Ort nicht genau bestimmbar bzw. festgelegt (11%), keine absolute

Masse (11%) und die de Broglie Wellenlänge (7%). Als Unterschiede zwischen einem klassischen Objekt und einem Quantenobjekt wurde lediglich von 11% der Probanden angeführt, dass Quantenobjekte keine Ortseigenschaft besitzen.

2.5 Permanente Ortseigenschaft

Das Antwortverhalten auf die gezielte Frage nach der permanenten Lokalisierung bei Quantenobjekten stellt sich nach *Wiesner* [13] wie folgt dar: „Die Mehrzahl der Schüler äußert spontan indifferente Bedenken gegen die Lokalisierung, geht aber sehr leicht davon ab und stimmt der permanenten Lokalisierung zu. ... Das hier beschriebene Endverhalten erscheint in dem Sinn „negativ“, dass vielen Schülern zwar bewusst ist, dass bei Elektronen einiges anders ist, sie haben aber keine klaren, stabilen Vorstellungen darüber, was anders ist“. Auch *Lichtfeldt* [14] stellt in seinen Untersuchungen fest, dass nach einer herkömmlichen Unterrichtseinheit zur Quantenphysik „bei gut 60% der Schüler die alten Vorstellungen eines mechanistischen geprägten Bildes erhalten geblieben [sind]“. Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Untersuchungen über Lernschwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern in der Mittel- und Oberstufe im Bereich der Atom- und Quantenphysik zeigen, dass es für viele Schülerinnen und Schüler sehr schwierig ist, die Denkweisen und Ansätze der Klassischen Mechanik zu überwinden. Die Evaluationen der auf der Grundlage dieser Ergebnisse erarbeiteten Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik in der Oberstufe [z. B. 15, 16, 17] zeigen deutlich, dass es auf der Grundlage der neuen Ansätze durchaus gelingt, die teils sehr gefestigten Schülervorstellungen zu überwinden und den Schülerinnen und Schülern wichtige und grundlegende Denkweisen der Quantenphysik zu vermitteln.

3 | Das Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe I

● Die Unterrichtseinheit zur Einführung in die Quantenphysik für die Sekundarstufe I soll den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in die Unterschiede der Quantenphysik zur Klassischen Physik und die sich daraus ergebenden Merkwürdigkeiten und Konsequenzen dieser neuartigen Physik geben. Dabei steht die Erarbeitung der Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der Klassischen Physik an den Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ im

¹ Der Schwerpunkt der Betrachtungen der Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten liegt im Folgenden auf den Vorstellungen von Elektronen, der Ortseigenschaft und dem Bahnbegriff in der Quantenphysik sowie den Unterschieden zwischen einem klassischen Objekt und einem Quantenobjekt. Teilweise wurden weitere Aspekte wie der Wahrscheinlichkeitsbegriff, die Quantisierung der Energie, Vorstellungen von Photonen und der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation in den Untersuchungen berücksichtigt, auf die hier nicht näher eingegangen wird (siehe dazu [1]).

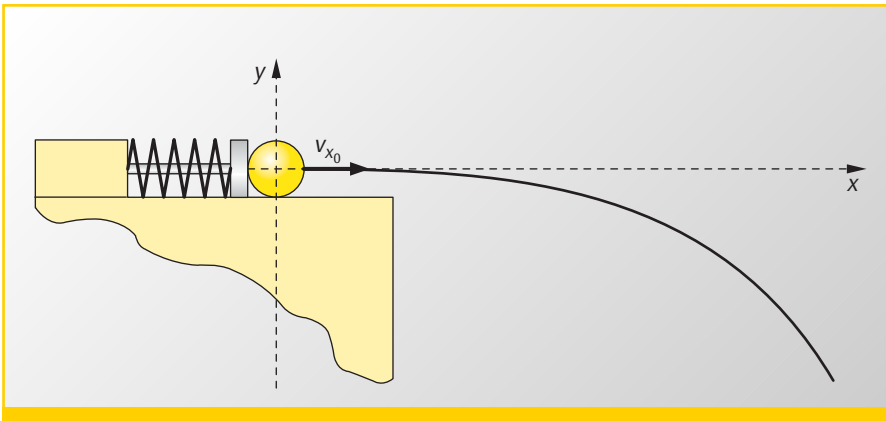


Abb. 2: Bahnkurve in der klassischen Physik

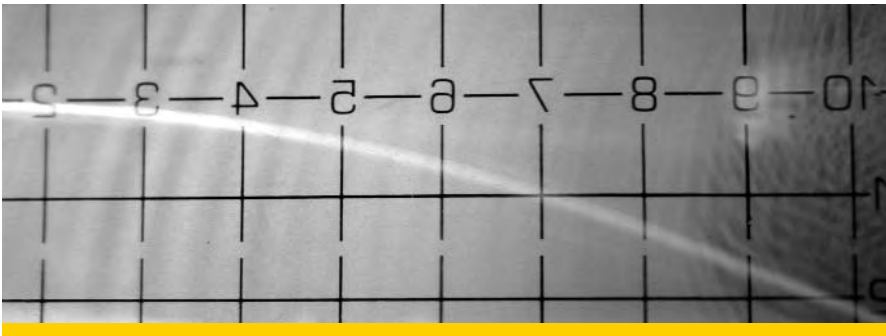


Abb. 3: Ablenkung des Elektronenstrahls in der Kathodenstrahlröhre

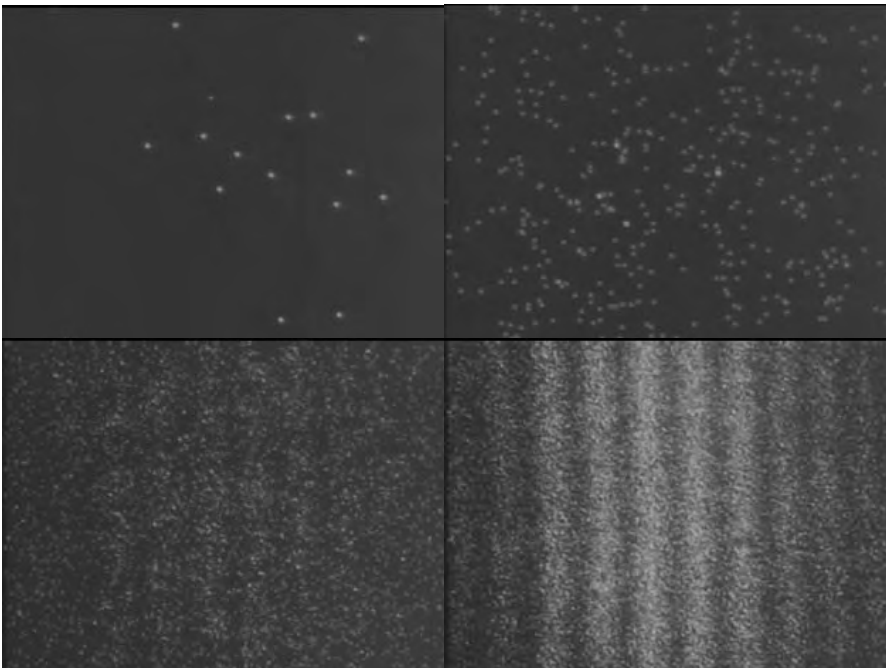


Abb. 4: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Vordergrund. Da die begriffliche Struktur der Lehrerfortbildung „milq“ (Münchener Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik) [18] verwendet wird, die auch dem Unterrichtskonzept für die Oberstufe zugrunde liegt [17], ist es möglich, dass ein aufbauender Unterricht über die Quantenphysik in der Oberstufe nach der gleichen Konzeption, aber deutlich vertieft erfolgen kann (siehe auch [3]).

Unterrichtseinheit 1: Wellen

Zu Beginn der Unterrichtseinheit wird das Thema „Wellen“ behandelt. Auf der Grundlage der Definition einer Welle und der Einführung verschiedener Arten mechanischer Wellen, werden die Phänomene der Interferenz und Beugung qualitativ betrachtet. Bei der Erarbeitung der Interferenz und des Interferenzmusters steht im Vordergrund, das Interferenzmuster als charakteristische

Erscheinung von Wellen bei der späteren Betrachtung des Doppelspaltexperimentes mit Elektronen deuten zu können und somit eine entscheidende Merkwürdigkeit in der Quantenphysik zu erkennen. Der Zusammenhang der Darstellungen des Interferenzmusters zum einen bei der Überlagerung zweier sich kreisförmig ausbreitender Wasserwellen (Abb. 1a) und zum anderen in Form des Streifenmusters (Abb. 1b) wird an dieser Stelle schon dargelegt.

Unterrichtseinheit 2:

Einführung in die Quantenphysik

Um die Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik sowie die damit einhergehenden Konsequenzen an Hand des Eigenschaftsbegriffs zu erarbeiten, wird zunächst das Beispiel des horizontalen Wurfs aufgegriffen.

Dieses Experiment zeigt deutlich, dass sich Körper in der klassischen Physik auf einer Bahnkurve bewegen und die Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ jederzeit ohne Probleme zugeschrieben werden können (Abb. 2). Der Frage, ob Quantenobjekte diese Eigenschaften ebenfalls jederzeit besitzen, wird mit Hilfe eines Experimentes mit der Kathodenstrahlröhre nachgegangen: Die Elektronen in der Kathodenstrahlröhre bewegen sich auf einer Bahnkurve, die der Bahn beim waagerechten Wurf entspricht und verhalten sich somit auf den ersten Blick wie klassische Objekte.

Betrachtet man jedoch die Größenverhältnisse der Bahnkurve im mm-Bereich und die Größe eines Elektrons in der Größenordnung von 10^{-16} mm nochmals genauer, führt dies zu der Frage, ob die Elektronen die Eigenschaft „Ort“ wirklich besitzen. Um diese Frage zu beantworten, wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen betrachtet, das 1959 von *Claus Jönsson* durchgeführt worden ist. Ein Film zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen [19] zeigt, dass sich mit der Zeit aus den zunächst wahllos erscheinenden hellen Punkten immer deutlicher ein Interferenzmuster herausbildet, welches den Erwartungen aus der Sichtweise der klassischen Physik nicht entspricht (Abb. 4).

Unterrichtseinheit 3:

Das Doppelspaltexperiment

Mit Hilfe eines Simulationsprogramms zum Doppelspaltexperiment [20] werden die Ergebnisse beim Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen und Elektronen verglichen und die Interpretation des Verhal-

tens der Elektronen am Doppelspalt herausgearbeitet: Beim Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen, hier mit Farbtröpfchen, ergibt sich die Verteilung auf dem Schirm bei zwei geöffneten Spalten aus der Summe der Einzelspaltverteilungen (Abb. 5).

Daraus kann man schließen, dass die Farbpartikel die Doppelspaltebene entweder durch Spalt 1 oder Spalt 2 passiert haben und sagen, dass die Farbpartikel die Eigenschaft „Ort“ besitzen. Im Vergleich dazu betrachtet man das Doppelspaltexperiment mit Elektronen und stellt fest, dass sich die Verteilung auf dem Schirm bei zwei geöffneten Spalten nicht mehr aus der Summe der Einzelspaltverteilungen ergibt (Abb. 6).

Man kann also nicht mehr sagen, dass die Elektronen beim Doppelspalt entweder durch Spalt 1 oder Spalt 2 gehen und somit besitzen die Elektronen nicht mehr die Eigenschaft „Ort“ in der Spaltebene. Diese zentralen und verblüffenden Ergebnisse beim Erarbeiten der Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der Klassischen Physik können sich die Schülerinnen und Schüler durch das Arbeiten mit dem Simulationsprogramm selbständig erarbeiten. Im Schülertext sind dazu die Experimente mit detaillierten Angaben zur Durchführung versehen. Im Anschluss an die Diskussion über das Doppelspaltexperiment wird der in der Quantenmechanik notwendige Übergang von einer Aussage über ein Einzelereignis zu einer Wahrscheinlichkeitsaussage behandelt: Im Film über das Doppelspaltexperiment [19] mit Elektronen lassen sich für einzelne Elektronen die Auftrefforte nicht mehr vorhersagen. Aber eine Aussage darüber, wo viele bzw. wenige Elektronen auf dem Schirm registriert werden, ist möglich, da sich die Elektronen beim Doppelspaltexperiment in Form eines Interferenzmusters auf dem Schirm anordnen.

Unterrichtseinheit 4:

Weitere Merkwürdigkeiten der Quantenphysik – Elektronen-Skiläufe

An Hand einer Cartoonserie (in Anlehnung an den Cartoon mit den Skifahrern von Charles Addams, in The New Yorker), dem „Ersten Elektronen-Skilauf“ und dem „Zweiten Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ werden die Ergebnisse des Doppelspaltexperiments auf eine alltägliche Situation übertragen und das Verhalten der Elektronen am Doppelspalt nochmals dis-

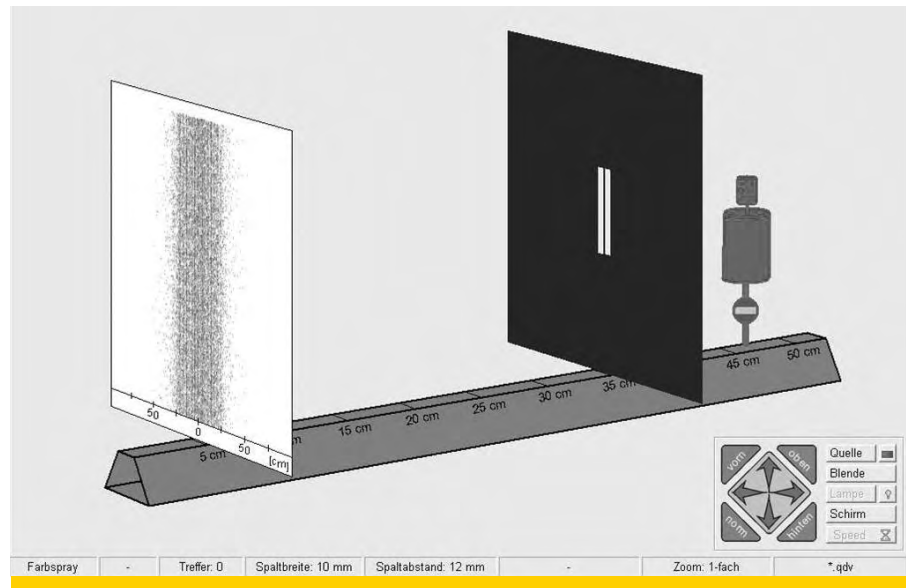


Abb. 5: Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen

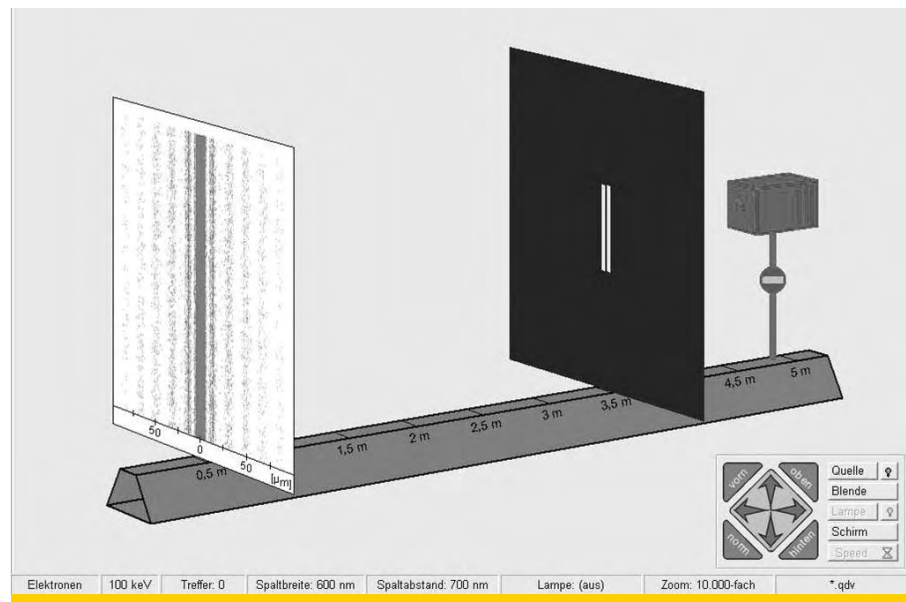


Abb. 6: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

kutiert. Die erste Abbildung zum „Ersten Elektronen-Skilauf“ stellt den Aufbau des Doppelspaltexperiments dar: Am Start befinden sich die Elektronenskiläufer, die entweder rechts oder links am Baum vorbei, also entweder durch Spalt 1 oder Spalt 2 beim Doppelspaltexperiment, ins Ziel fahren sollen (Abb. 7). Dies entspricht einem Zwei-Wege-Problem in der Quantenmechanik.

Die nächste Abbildung zeigt, dass schon einige Elektronenskiläufer im Ziel an verschiedenen Stellen angekommen sind und die Spuren um den Baum deuten darauf hin, dass die Elektronenskiläufer scheinbar gleichzeitig mit einem Ski rechts und einem Ski links um den Baum herum gefahren sind (Abb. 8).

Die letzte Abbildung zum „Ersten Elektronen-Skilauf“ zeigt noch deutlicher, dass die Elektronenskiläufer gleichzeitig sowohl rechts als auch links mit einem Ski das Hindernis „Baum“ passiert haben. Zudem entspricht die Verteilung der Skifahrer im Ziel einem Interferenzmuster (Abb. 9).

Der „Zweite Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ greift das Doppelspaltexperiment mit Ortsmessung in der Spaltebene auf: Um Informationen über das Verhalten der Elektronenskiläufer in der Baumebene zu erhalten, sind sowohl rechts als auch links am Baum Livecams angebracht worden. Der „Zweite Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung“ hat schon begonnen und es befindet sich ein Elektronenskiläufer auf der Piste (Abb. 10).



Abb. 7: Der „Erste Elektronen-Skilanglauf“



Abb. 8: Die ersten Skifahrer haben das Ziel erreicht („Erster Elektronen-Skilanglauf“)



Abb. 9: Fast alle Skifahrer haben das Ziel erreicht („Erster Elektronen-Skilanglauf“)

Die zweite Abbildung zeigt, dass auf einer der Livecams ein vollständiger Elektronenskifahrer beobachtet wird und dass sich die Spuren um den Baum verändert haben: Die Spuren zeigen nun, dass die Elektronenskifahrer mit beiden Ski gleichzeitig entweder rechts oder links am Baum vorbei fahren. Im Ziel haben sich die Elektronenskifahrer bisher nur an zwei Stellen gesammelt (Abb. 11).

Die letzte Abbildung zeigt noch einmal deutlicher, dass sich die Spuren in der Baumebene verändert haben. Zudem haben sich die Elektronenskifahrer bei einer Ortsmessung an zwei Stellen im Ziel angesammelt, also in der Verteilung, wie man sie beim Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen erhält und nicht in Form des Interferenzmusters (Abb. 12).

Somit wird eine weitere Merkwürdigkeit im Verhalten der Elektronen erarbeitet und auf die Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster hingeführt. Diese kann dann nochmals mit Hilfe des Simulationsprogramms zum Doppelspaltexperiment eingehender untersucht werden. Im Zusammenhang über die Diskussion des Eigenschaftsbegriffs bei Quantenobjekten ist es zudem wichtig, dass der Unterschied zwischen „Besitzen von Eigenschaften“ und „Messen von Eigenschaften“ klar herausgearbeitet wird: Auch wenn man bei einer Messung des Ortes einen Messwert erhalten hat, kann man daraus nicht schließen, dass das Quantenobjekt kurz vor oder auch nach der Messung diese Eigenschaft besitzt. Diese Erkenntnis stellt wiederum einen zentralen Unterschied zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik dar. Ein Exkurs über „Schrödingers Katze“ liefert die Möglichkeit, die bisher behandelten Merkwürdigkeiten der Quantenphysik an Hand dieses Gedankenexperiments nochmals abschließend zu diskutieren.

Unterrichtseinheit 5: Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation

Zu Beginn des Kapitels über die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation wird die Präparation an dem schon bekannten Beispiel des horizontalen Wurfs erarbeitet und die Frage motiviert, wann ein Objekt eine Eigenschaft besitzt und wie man dies feststellen kann. Dazu betrachtet man die Eigenschaften „Seitenlänge“ und „Durchmesser“ bei einer runden und einer quadratischen Platte. Da die Messwerte bei der Messvorschrift für den Durchmesser bei einer runden Platte nicht streuen, hingegen

aber bei einer quadratischen Platte, kann man nur der runden Platte die Eigenschaft „Durchmesser“ zusprechen (Abb. 13). Bei der quadratischen Platte verhält es sich genau umgekehrt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig auf die Streuung von Messwerten im Unterschied zu den beispielsweise durch Messgeräte verursachten Messungenauigkeiten hinzuweisen. An dem Beispiel der runden und der quadratischen Platten wird somit deutlich, dass es schon in der klassischen Physik Probleme geben kann, zwei Eigenschaften an einem Objekt zu präparieren. Mit Hilfe des Simulationsprogramms zum Doppelspaltexperiment [20] wird das Ergebnis der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation erarbeitet: Bei Quantenobjekten ist die Verringerung der Streuung in den Messwerten für die Eigenschaft „Ort“ gleichzeitig mit einer größeren Streuung in den Messwerten für die Eigenschaft „Geschwindigkeit“ verbunden. Damit ist es nicht möglich, Quantenobjekte gleichzeitig auf „Ort“ und „Geschwindigkeit“ zu präparieren. Dieses Erkenntnis bedeutet zugleich, dass der Bahnbegriff, wie er in der klassischen Physik verwendet wird, in der Quantenphysik nicht mehr aufrecht gehalten werden kann. Die Beobachtung einer Bahn, auf der sich ein Elektron in der Kathodenstrahlröhre bewegt, widerspricht aber nicht der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, da die Aufweitung des Elektronenstrahls lediglich in der Größenordnung von einigen Nanometern liegt und derzeit mit den besten Detektoren nicht nachgewiesen werden kann.

Unterrichtseinheit 6:

Anwendungsmöglichkeiten der Quantenphysik – Der Quantencomputer

Einen Einblick in die Anwendungsmöglichkeiten der Quantenphysik bietet das letzte Kapitel, in dem der Quantencomputer behandelt und das neue Potential beim Arbeiten mit Quantenobjekten aufgezeigt wird. Der Vergleich zwischen klassischem Computer und Quantencomputer liefert einen Überblick über die jeweiligen Informationsträger sowie die Art der Informationsverarbeitung. Zum Abschluss des Kapitels wird auf die Schwierigkeiten und einige Möglichkeiten in der experimentellen Realisierung eingegangen.

Zu einer abschließenden Diskussion über die erarbeiteten Inhalte eignet sich ein Ausschnitt aus dem Film „What the bleep do we know?“ [21]. Die Darstellungen und Er-



Abb. 10: Der „Zweite Elektronen-Skilauf“ mit Liveübertragung



Abb. 11: Die ersten Skifahrer haben das Ziel erreicht („Zweiter Elektronen-Skilauf“)

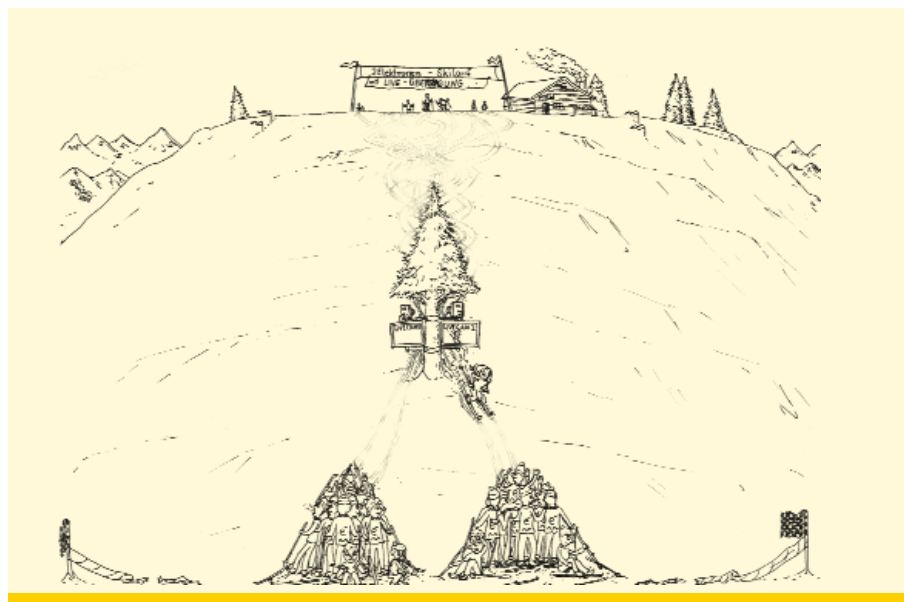


Abb. 12: Fast alle Skifahrer haben das Ziel erreicht („Zweiter Elektronen-Skilauf“)

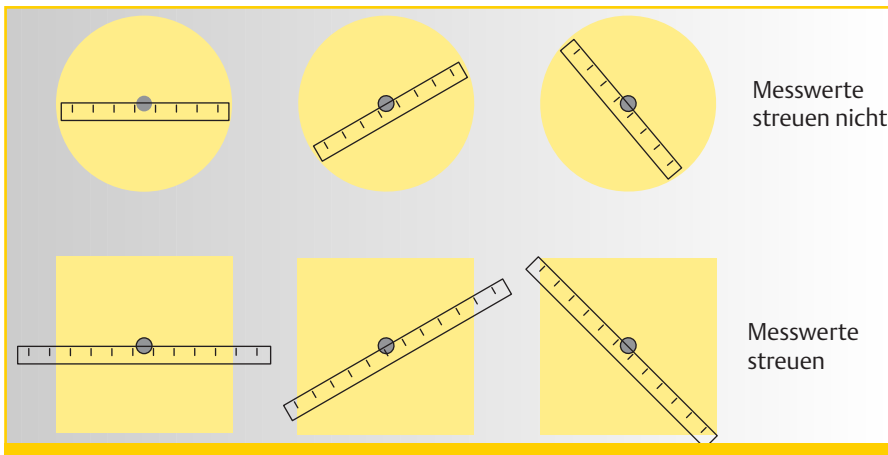


Abb. 13: Messverfahren für die Eigenschaft „Durchmesser“

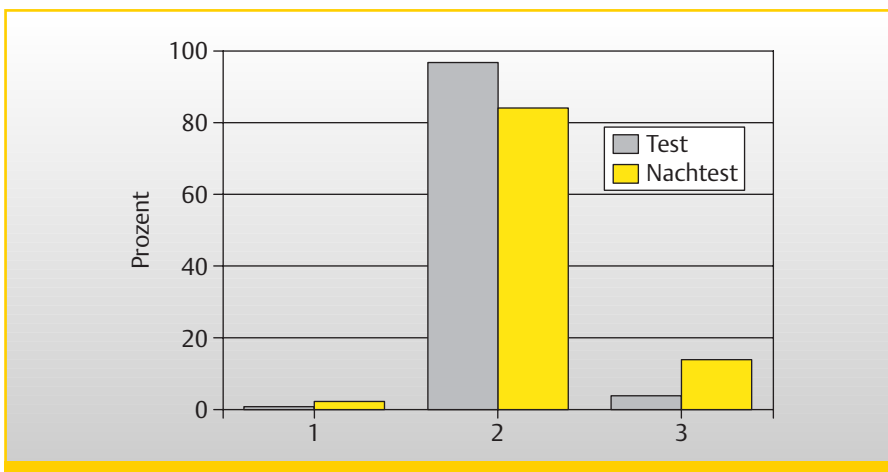


Abb. 14: Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ in der klassischen Physik

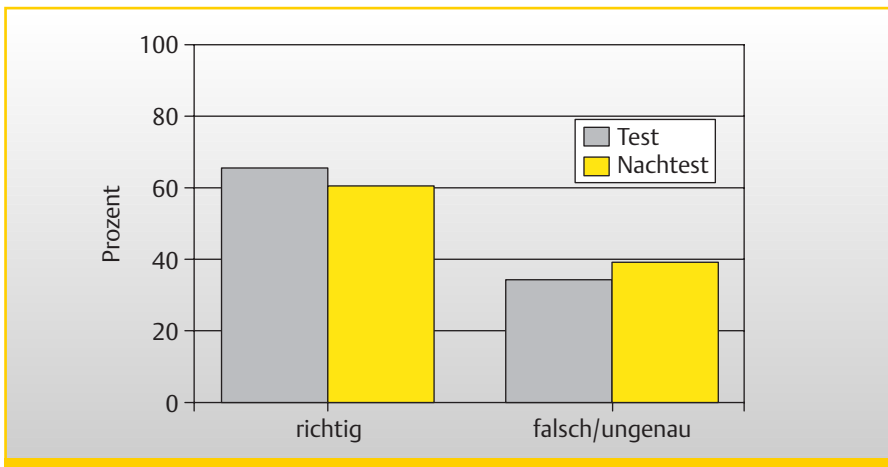


Abb. 15: Zuordnung eines Spalts beim Passieren des Doppelspalts

klärungen seitens Dr. Quantum führen zu sehr interessanten Beiträgen von Seiten der Schülerinnen und Schüler z.B. über die Richtigkeit der Darstellung im Rahmen dieses Filmausschnitts.

4 | Ergebnisse der Erprobung

Um erste Erfahrungen zu sammeln, hat zunächst eine Vorerprobung mit 8 Schülern stattgefunden. Das Ziel war es herauszufin-

den, ob die Inhalte des Unterrichtskonzepts bei Schülerinnen und Schülern auf Interesse stoßen, ob der Lehrtext verständlich ist und ob die wesentlichen Inhalte erlernt werden. Die Ergebnisse dieser Erprobung zeigen deutlich, dass die Inhalte von Seiten der Schüler nach dem Durcharbeiten des Lehrtextes sehr gut erschlossen und richtig wiedergegeben werden konnten sowie als sehr interessant bewertet wurden. In der Haupterprobung wurden bisher fünf

Klassen (137 Schülerinnen und Schüler) nach dem Unterrichtskonzept unterrichtet und zur Erhebung des Wissens, dem Interesse und der Verständlichkeit wurden nach jedem Kapitel Tests geschrieben. Um die Nachhaltigkeit der erlernten Inhalte zu erfassen, fand nach 5 Monaten ein zeitverzögerter Nachttest mit einer Auswahl von Items aus den Tests der Haupterprobung statt. Eine Vergleichsuntersuchung wurde u.a. deshalb nicht durchgeführt, weil die begrifflichen Lernangebote und die Ziele verschiedener Zugänge erheblich unterscheiden und eine Vergleichbarkeit schon von daher nicht gegeben ist. Im Folgenden wird eine Auswahl von Ergebnissen vorgestellt.

Auf die Frage, ob in der klassischen Physik Körpern die Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ zu keinem Zeitpunkt (1), zu jedem Zeitpunkt (2) oder nur eine der Eigenschaften zu jedem Zeitpunkt (3) zugeschrieben werden können, gaben 97% der Schülerinnen und Schüler im Test und 84% im Nachttest die richtige Antwort (Abb. 14). Dass sich Quantenobjekte nicht zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort befinden, beantworteten im Test 96% und im Nachttest 89% der Probanden richtig. In diesem Zusammenhang ergab sich auf die Frage „Kann man jedem Elektron beim Doppelspaltexperiment eindeutig einen Spalt zuordnen, durch den es die Spaltebene passiert“ folgende Verteilung: 66% richtige Antworten im Test und 61% im Nachttest (Abb. 15).

Die Frage nach der Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster wurde von rund 98% der Schülerinnen und Schülern im Test und von 87% im Nachttest richtig beantwortet und bezüglich des Unterschieds zwischen „Besitzen von Eigenschaften“ und „Messen von Eigenschaften“ ergab sich folgendes sehr beeindruckendes positive Ergebnis (1: Man kann an einem Quantenobjekt prinzipiell jederzeit die Eigenschaft „Ort“ messen; 2: Quantenobjekte besitzen jederzeit die Eigenschaft „Ort“; 3: Erhält man bei der Messung der Eigenschaft „Ort“ einen Messwert, kann man daraus nicht schließen, dass das Quantenobjekt vor der Messung die Eigenschaft „Ort“ besessen hat) (Abb. 16).

Die Konsequenz der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, dass die Vorstellung einer Bahn, auf der sich ein Teilchen bewegt, in der Quantenphysik nicht richtig ist, gaben 80% der Probanden im Test und 60% im Nachttest richtig wieder.

5 | Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse zeigen deutlich, dass die angestrebten Lernziele von der überwiegenden Mehrzahl der Lernenden erreicht worden sind und dass schon in der 10. Klasse begrifflich anspruchsvolle Themen zur Quantenphysik sehr erfolgreich gelernt werden können. Die bildungspolitische Entscheidung, allen Schülerinnen und Schülern, also auch denen, die Physik in der Oberstufe abwählen, wesentliche Grundideen des modernen physikalischen Weltbildes zu vermitteln, ist u. E. richtig und erfolgreich realisierbar. Zudem sind die Inhalte des Unterrichtskonzepts bei den Schülerinnen und Schülern durchweg auf Interesse und Akzeptanz gestoßen, was folgende Zitate unterstreichen:

„Wer sagt, er hat die Quantenmechanik verstanden, der lügt! ⇒ es ist jedoch anzumerken, dass der Unterricht interessant und verständlich gestaltet wurde. Sehr gut!“,

„Mehr Quantenphysik im Physikunterricht!!!“ oder auch

„Das Ganze war viel interessanter als die gesamte 9. Klasse in Physik.“

Dieses allgemeine positive Stimmungsbild spiegelt auch die Abbildung zu der Frage „Möchtest Du gerne mehr über die Quantenphysik erfahren?“ wider (Abb. 17).

Derzeit werden weitere Erprobungen des Unterrichtskonzepts durchgeführt.

Literatur

- [1] Müller, R.: Quantenphysik in der Schule, Logos Verlag, Berlin 2003
- [2] Materialien des Unterrichtskonzepts: http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/quantenphysik_sek1/index.html
- [3] Müller, R.: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule 6/57 (2008), S. 19ff.
- [4] Knote, H.: Zur Atomvorstellung von Dreizehn- bis Fünfzehnjährigen. In: Der Physikunterricht 1975/4. S. 86 – 96.
- [5] Fischler, H., Lichtfeldt, M., Peuckert, J.: Die Teilchenstruktur der Materie im Physikunterricht der Sekundarstufe I (Teil 1): Kann Forschung den didaktischen Wirrwarr beenden? In: DPG Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1997 in Berlin (1997) S. 572 – 577.
- [6] Lichtfeldt, M., Fischler, H., Peuckert, J. (1997): Die Teilchenstruktur der Materie im Physikunterricht der Sekundarstufe I (Teil 2): Exemplarische Ergebnisse einer Quer- und Längsuntersuchung im Rahmen des Forschungsprojektes „Wege zum Atombegriff (WezAb)“, in: DPG Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1997 in Berlin, S. 578 – 583.
- [7] Peuckert, J., Fischler, H., Lichtfeldt, M.: Die Teilchenstruktur der Materie im Physikunterricht der Sekundarstufe I (Teil 3): Stabilität und Ausprägung von Vorstellungen zum Atombegriff, in: DPG Fachverband Di-

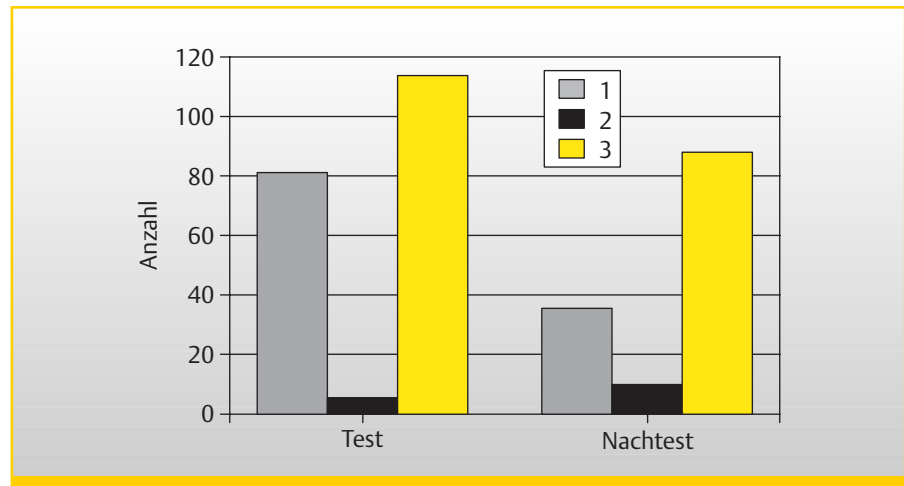


Abb. 16: Unterschied zwischen „Besitzen“ und „Messen“ von Eigenschaften in der Quantenphysik

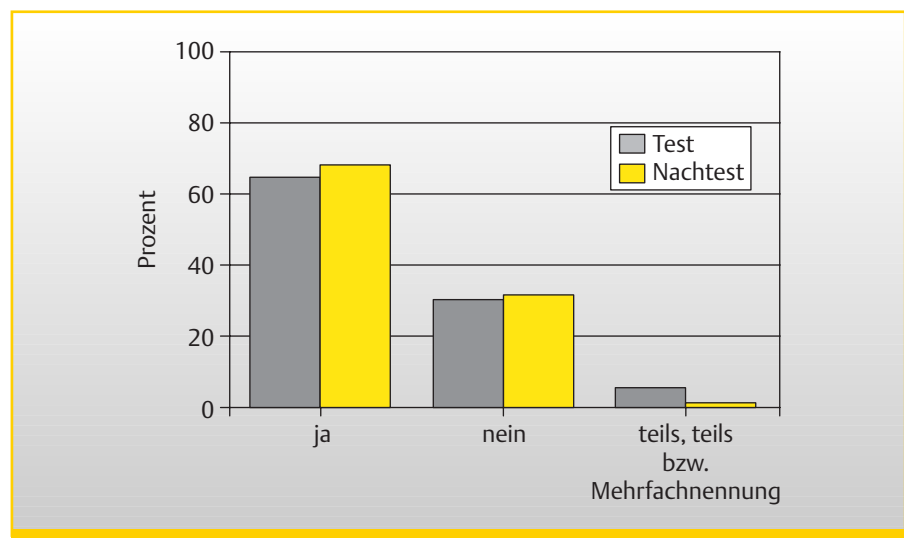


Abb. 17: „Möchtest du gerne mehr über die Quantenphysik erfahren?“

- daktik der Physik (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1997 in Berlin (1997). S. 584 – 589.
- [8] Bayer, H.-J.: Schülervorstellungen beim Übergang vom Bohrschen zum wellenmechanischen Atommodell, in: W. Kuhn (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1986 in Gießen (1986). S. 249 – 256.
- [9] Bormann, M.: Das Schülervorverständnis zum Themenbereich „Modellvorstellungen zu Licht und Elektronen“, in: W. Kuhn (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1987 in Berlin (1987) S. 475 – 481.
- [10] Bethge, T.: Empirische Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Quantenphysik, in: W. Kuhn (Hrsg.): Didaktik der Physik Vorträge – Physikertagung 1988 in Gießen (1988). S. 249 – 254.
- [11] Bethge, T.: Schülervorstellungen zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik, in: H. Fischler (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule, IPN, Kiel (1992). S. 215 – 233.
- [12] Wiesner, H.: Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe, Westarp Verlag, Essen 1989.
- [13] Wiesner, H.: Verbesserung des Lernerfolgs im Physikunterricht durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten und Lernprozessen, Habilitationsschrift, Frankfurt am Main, 1993.
- [14] Lichtfeldt, M.: Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht, Westarp Verlag, Essen (1992).

- [15] Niedderer, H.: Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell, in: Fischler, H. (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule, IPN Kiel (1992) S. 88 – 113.
- [16] 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).
- [17] Müller, R., Wiesner, H.: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik, in: Physik in der Schule 38 (2000), S. 126 – 134.
- [18] www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq
- [19] Film zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen: <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/movie.cfm>
- [20] Simulationsprogramm zum Doppelspaltversuch: http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/doppelspalt/index.html
- [21] Filmausschnitt „What the bleep do we know?“, http://sommer.youteach.de/324_youteach_weblog/archive/3688_dr_quantum_bei_youteach.html

Anschrift der Verfasser

B. Schorn, Prof. Dr. Dr. H. Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, 80799 München,
E-Mail: Bernadette.Schorn@physik.uni-muenchen.de