

Heisenberg kennt dieses „Stirb und Werde“ aus seiner Nacht auf Helgoland, die ihn von einer Welt – die der klassischen Physik – in eine neue Welt – die der Quantenmechanik – bringt, und deshalb kann er sein Verlassen und Überwinden der alten Theorie auch mit der Passage des Kolumbus vergleichen, als der spanische Seefahrer im 15. Jahrhundert genau das entdeckt hat, was wir heute die neue Welt nennen.

Heisenberg bleibt sein Leben lang ein Wanderer zwischen zwei Welten, nicht nur in der hier geschilderten Entdeckung und in seiner gleichzeitigen Vertrautheit mit der romantischen Jugendbewegung und der mathematischen Wissenschaft, sondern auch und gerade wenn er sich einem Problem sowohl als kreativer Künstler als auch als pedantischer Rechner nähert. In der Nacht auf Helgoland lässt sich Heisenberg gerne von den Ideen inspirieren, „die in einem Kopf des Nachts umhergehen“, wie es Georg Christoph Lichtenberg erfahren

und ausgedrückt hat (Sudelbücher [J 598] [9]). Heisenberg weiß aber zugleich, dass er im Detail nachrechnen muss, ob der Energiesatz an jeder Stelle präzise erfüllt ist. Und erst wenn das Künstlerische und das Mathematische – diese beiden Welten des Subjektiven und Objektiven – zusammenfinden, beruhigt sich Heisenbergs Geist, und er weiß, dass er jetzt angekommen ist in der neuen Welt, die alle gesucht haben. Heisenberg hat den Weg gefunden, und jetzt kann er sich aufmachen, um uns zu holen. Die neue Welt steht für uns alle offen. ■

#### Literatur

- [1] G. Steiner (2004). *Grammatik der Schöpfung*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München  
 [2] J. Watson (2011). *Die Doppelhelix: Ein persönlicher Bericht über die Entdeckung der DNS-Struktur*, Rowolt, Berlin, 21. Auflage  
 [3] J.W. Goethe (1790). *Die Metamorphose der Pflanzen*, in: *Sämtliche Werke*, Band 16, Artemis Verlag/Deutscher Taschenbuchverlag, Zü-

rich/München 1977

[4] W. Heisenberg (1973). *Der Teil und das Ganze: Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München,

[5] N. Bohr, H.A. Kramers, J.C. Slater (1924). *Über die Quantentheorie der Strahlung*. *Zeitschrift für Physik* 24, 69-87

[6] W. Pauli (1961). *Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie*. Vieweg, Braunschweig

[7] I. B. Cohen, *Revolutionen in der Physik*, Frankfurt am Main 1994

[8] Darüber berichtet Jaques Hadamard in seinem Buch "An Essay of Invention in the Mathematical Field", Princeton 1945.

[9] G.C. Lichtenberg. *Sudelbücher*, marix-Verlag, 2011

#### Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Ernst Peter Fischer, Universität Heidelberg, Wilckensstr. 16/1, D-69120 Heidelberg  
 E-Mail: epfischer@t-online.de

# Das Münchener Internetprojekt

zur Lehrerfortbildung (milq) in der 10. Jahrgangsstufe

H. Wiesner u. B. Schorn

## 1 Quantentheorie bei milq

Für die Konzeption eines Unterrichts über Quantenphysik muss die Entscheidung gefällt werden, welche Besonderheit der Quantentheorie gegenüber der klassischen Physik in den Vordergrund gestellt werden soll. In dem Projekt milq (Münchener Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik) [1-3] wird als eines der wesentlichen Merkmale der Quantentheorie herausgestellt, dass die beiden folgenden Aussagen „Das Objekt O hat die Eigenschaft A“ und „Bei einer Messung an dem Objekt O zeigt sich die Eigenschaft A“ grundsätzlich zu unterscheiden sind. In der klassischen Physik haben beide die gleiche Bedeutung, in der Quantentheorie nicht [4]. Ein bekanntes Beispiel ist die Diskussion des Doppelspaltversuchs bei Feynman [5]. Ein zweites Beispiel: Wenn man

mehrfach den Abstand  $r$  des Elektrons zum Kern bei Wasserstoffatomen im Grundzustand mit der Energie  $E_0$  misst (oder theoretisch berechnet), erhält man die bekannte Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Angenommen, im Abstand  $r$  habe das Elektron die entsprechende potentielle Energie  $E_{\text{pot}}(r)$ , wie es klassisch der Fall ist. Dann findet man etwa 25% der Elektronen in einem Abstand  $r$ , in dem die potentielle Energie größer als die Energie im Grundzustand ist. Für diese Elektronen müsste die kinetische Energie negativ sein, ein unsinniges Ergebnis. Misst man bei einem klassischen Objekt den Ort (oder den Impuls), dann ist der Schluss gerechtfertigt anzunehmen, dass das Objekt unmittelbar vor der Messung genau diesen Ort (oder Impuls) hatte. Bei Quantenobjekten ist dies im Allgemeinen, wie die eben angeführten

Beispiele zeigen, nicht zulässig. Die Vorstellung, dass ein Quantenobjekt zu jedem Zeitpunkt eine Ortseigenschaft (und eine Impulseeigenschaft) hat, ist also falsch und ein grundlegender Unterschied zu den Annahmen in der klassischen Physik.

In milq werden die Ergebnisse der Quantentheorie zunächst im Rahmen der Gesamtheitsinterpretation gedeutet. Die theoretischen und experimentellen Aussagen werden also auf statistische Gesamtheiten bezogen. Im Bereich der Quantenmechanik ist es aber in folgenden Fällen zulässig, den einzelnen Quantenobjekten eine Eigenschaft zuzuordnen und damit zutreffende Schlussfolgerungen zu ziehen (Prognosen zu formulieren). Einer auf eine bestimmte Weise (Präparation) erzeugten Gesamtheit ist eine Zustandsfunktion  $\psi$  zugeordnet, die alle Informationen enthält.

Einer messbaren Eigenschaft  $A$  (Ort, Impuls, Energie, ...) ist ein (selbstadjungierter) Operator  $\hat{A}$  zugeordnet. Erfüllt  $\psi$  die Eigenwertgleichung

$$\hat{A}\psi = a\psi$$

mit einer reellen Zahl  $a$ , dann ist die Annahme, dass die Objekte dieser Gesamtheit die Eigenschaft  $A$  (mit dem Wert  $a$ ) haben, zulässig, andernfalls nicht. Jede Messung der Eigenschaft  $A$  an den Quantenobjekten der Gesamtheit liefert genau den Messwert  $a$ . Das Elektron im Grundzustand des Wasserstoffatoms hat die Eigenschaft „Gesamtenergie“ mit dem Wert  $E_0$ , jede Messung an einem Objekt der Gesamtheit liefert diesen Messwert. Aber es besitzt weder die Eigenschaften Ort, Impuls, kinetische Energie oder potentielle Energie. Theoretisch heißt das, dass die entsprechende Eigenwertgleichung nicht erfüllt ist. Experimentell bedeutet es, dass die Messwerte streuen. Gleiches gilt für das Standardbeispiel im Quantenphysikunterricht, den unendlich tiefen, linearen Potentialtopf. Jede Messung der Gesamtenergie an den Elementen der Gesamtheit im Grundzustand liefert den gleichen Wert

$$E_1 = \frac{h^2 \pi^2}{2ma^2}$$

(die Streuung der Messwerte ist folglich null). Messungen des Ortes, des Impulses, der kinetischen Energie und der potentiellen Energie streuen. Folglich ist die Annahme, dass ein Teilchen im Potentialtopf vor der Messung einen Impuls, eine kinetische Energie oder eine potentielle Energie hätte, unzulässig. Schlüsse mit diesen Annahmen können zu falschen Aussagen führen. Nur dann, wenn eine Gesamtheit auf eine bestimmte Eigenschaft präpariert worden ist, sind die Annahme des Vorhandenseins dieser Eigenschaft und Schlüsse damit zulässig. Die Elektronen, die ein Wienfilter durchlaufen haben, sind z. B. auf Impuls und kinetische Energie präpariert.

In milq wird für Oberstufenschüler in elementarisierter Weise der Energieoperator eingeführt. Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation wird als Aussage über die eingeschränkte Präparierbarkeit einer Gesamtheit formuliert: Es ist nicht möglich eine Gesamtheit von Quantenobjekten so zu präparieren, dass das Produkt der Streuungen von Ort und Impuls beliebig klein ist (nicht kleiner als  $\hbar/2$ ).

Für die Schülerinnen und Schüler ist der Gedanke, dass man den Quantenobjekten nicht permanent, also auch vor einer Ortsmessung, eine Ortseigenschaft zu-

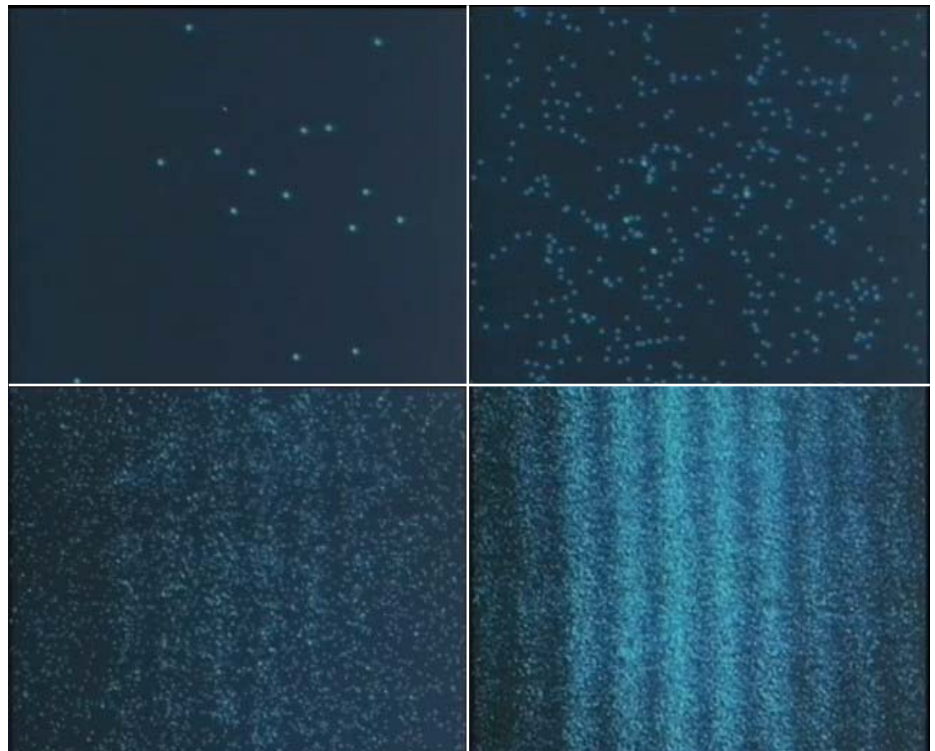


Abb. 1: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

ordnen kann, extrem ungewöhnlich und spektakulär. Unser an Makroobjekten geschultes Denken nimmt selbstverständlich und ohne Widersprüche an, dass zum Beispiel der Mond in diesem Moment, an einem bestimmten Ort in der Nähe der Erde ist und sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt, auch wenn man diese Daten im Moment nicht kennt und den Mond auch nicht sehen kann.

## 2 Die Elementarisierung von milq für die 10. Jahrgangsstufe

Das Konzept von milq wurde in der Oberstufe erfolgreich unterrichtet [6]. Mit der Einführung des achtjährigen Gymnasiums in Bayern endet für die meisten Schülerinnen und Schüler der Physikunterricht mit der 10. Klasse. Um auch diesen Schülerinnen und Schülern eine Einführung in grundlegende Gedanken der Quantenphysik zu geben, muss ein geeigneter, erfolgversprechender Lehrgang entwickelt werden – eine echte Herausforderung. Für die elementarisierte Version von milq soll die Erarbeitung der Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik am Beispiel der Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ im Vordergrund stehen. Eine Beschreibung des Lehrgangs ist in [7] gegeben worden (die Unterrichtsmaterialien sind unter [8] abrufbar). Nachfolgend wird deshalb nur eine kurze Beschreibung der Inhalte der einzelnen Kapitel gegeben, bevor ausführlicher auf die Ergebnisse der empirischen Untersuchung eingegangen wird.

### Kapitel 1: Wellen

Zur Vorbereitung auf das Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch mit Elektronen wird die Unterrichtseinheit mit dem Thema „Wellen“ begonnen. An der Wellenwanne werden die für Wellen charakteristischen Phänomene der Interferenz und Beugung qualitativ behandelt.

### Kapitel 2: Einführung in die Quantenphysik

Am Beispiel des horizontalen Wurfs wird wiederholt und verdeutlicht, dass sich Körper in der klassischen Physik auf einer Bahnkurve bewegen und ihnen die Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ jederzeit ohne Probleme zugeschrieben werden können. Der Frage, ob Quantenobjekte diese Eigenschaften ebenfalls jederzeit besitzen, wird anhand der Kathodenstrahlröhre nachgegangen. Auf den ersten Blick sieht es so aus, als ob auch dort sinnvoll von einer Bahnkurve wie beim horizontalen Wurf gesprochen werden kann. Aber die Betrachtung der Größenverhältnisse der Bahnkurve im mm-Bereich und die Größe eines Elektrons in der Größenordnung von  $10^{-16}$  mm, führt zu der Frage, ob die Elektronen die Eigenschaft „Ort“ wirklich besitzen. Zur Beantwortung wird das Jönsson-Experiment mit Elektronen herangezogen. Ein Film zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen [9] zeigt, dass sich mit der Zeit aus den zunächst wahllos erscheinenden hellen Punkten immer deutlicher ein Interferenzmuster herausbildet, welches den Erwartungen aus

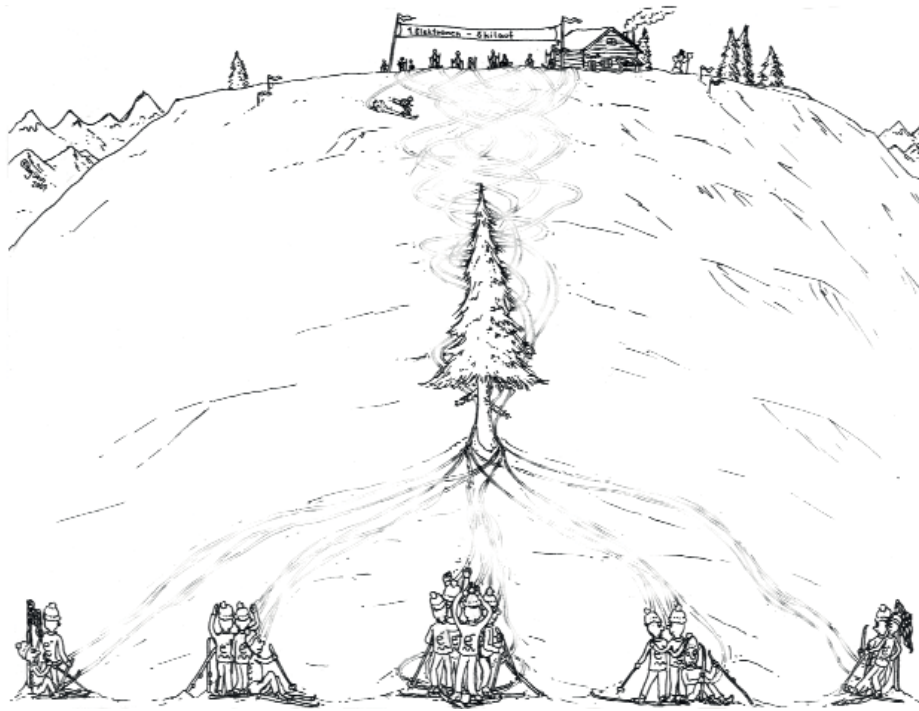


Abb. 2: Fast alle Skifahrer haben das Ziel erreicht (Erster Elektronen-Skilauf), Bild: Severin Bauer, aus [11]

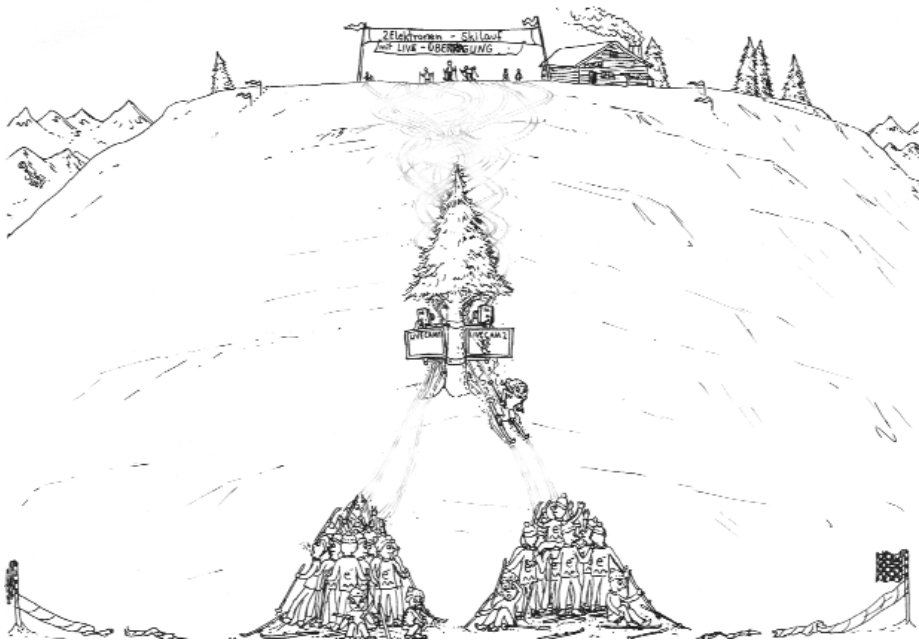


Abb. 3: Fast alle Skifahrer haben das Ziel erreicht (Zweiter Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung), Bild: Severin Bauer, aus [11]

der Sichtweise der klassischen Physik überhaupt nicht entspricht (siehe Abb. 1).

### Kapitel 3.1 und 3.2: Das Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen und das Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Mithilfe eines Simulationsprogramms aus milq zum Doppelspaltexperiment [10] werden die Ergebnisse beim Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen und Elektronen verglichen und die Interpreta-

tion des Verhaltens der Elektronen am Doppelspalt herausgearbeitet: Man kann 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.

Im Anschluss an die Diskussion über das Doppelspaltexperiment wird der in der Quantenmechanik notwendige Übergang von einer Aussage über ein Einzelereignis zu einer Wahrscheinlichkeitsaussage be-

handelt: Im Film über das Doppelspaltexperiment mit Elektronen [9] lassen sich für einzelne Elektronen die Auftrefforte nicht mehr vorhersagen, aber die Häufigkeiten gemäß des Interferenzmusters auf dem Schirm.

### Kapitel 3.3: Weitere Merkwürdigkeiten der Quantenphysik

Anhand einer Cartoonserie, dem *Ersten Elektronen-Skilauf* und dem *Zweiten Elektronen-Skilauf* mit Liveübertragung werden die Ergebnisse des Doppelspaltexperimentes mit Elektronen in die Alltagswelt übertragen und das Verhalten der Elektronen am Doppelspalt nochmals diskutiert. Die Abbildung zum *Ersten Elektronen-Skilauf* zeigt z. B., dass die Elektronenskifahrer scheinbar gleichzeitig sowohl rechts als auch links mit einem Ski das Hindernis „Baum“ passiert haben. Zudem entspricht die Verteilung der Skifahrer im Ziel einem Interferenzmuster (siehe Abb. 2).

Der *Zweite Elektronen-Skilauf mit Liveübertragung* greift das Doppelspaltexperiment mit Elektronen mit Ortsmessung in der Spaltebene auf: Um Informationen über das Verhalten der Elektronenskifahrer in der Baumebene zu erhalten, sind sowohl rechts als auch links am Baum Livecams angebracht worden. Das Ergebnis in Abb. 3 zeigt, 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. Somit wird eine weitere Merkwürdigkeit im Verhalten der Elektronen erarbeitet und auf die Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster hingeführt.

Im Zusammenhang über die Diskussion des Eigenschaftsbegriffs bei Quantenobjekten ist es zudem wichtig, dass der Unterschied zwischen dem „Besitzen von Eigenschaften“ und dem „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 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.



#### Kapitel 4: 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. Eine Eigenschaft ist genau dann vorhanden, wenn alle Testmessungen den gleichen Wert ergeben. Streuen die Messergebnisse, dann ist die Eigenschaft nicht vorhanden. Zur Veranschaulichung 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 (siehe Abb. 4). In Bezug auf die Eigenschaft „Seitenlänge“ 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.

Mithilfe des Simulationsprogramms zum Doppelspaltexperiment [10] 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 Vergrößerung der Streuung in den Messwerten für die Eigenschaft „Geschwindigkeit“ verbunden. Damit ist es nicht möglich, Quantenobjek-

te gleichzeitig auf „Ort“ und „Geschwindigkeit“ zu präparieren. Diese Erkenntnis bedeutet zugleich, dass der Bahnbegriff, wie er in der Klassischen Physik verwendet wird, in der Quantenphysik nicht mehr aufrecht gehalten werden kann.

Zu einer abschließenden Diskussion über die erarbeiteten Inhalte eignet sich ein Ausschnitt aus dem Film „What the bleep do we (k)now?“ [12]. Die Darstellungen und Erklärungen 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.

#### 3 Ergebnisse der empirischen Untersuchung

Die beschriebene Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe wurde in 14 Klassen an fünf bayerischen Gymnasien erprobt. Insgesamt nahmen 351 Probandinnen und Probanden des naturwissenschaftlich-technologischen, sprachlichen sowie wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Zweiges an der Erprobung teil. Das Ziel der empirischen Untersuchung lag darin, die Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption hinsichtlich des Lernerfolgs sowie die Interessantheit und Verständlichkeit der Inhalte als auch das Interesse am Thema Quantenphysik zu erheben, zu analysieren und zu bewerten. Dabei war auch von Interesse, welche der erhobenen Faktoren (z. B. Fachinteresse, Physiknote, Geschlecht, Ausbildungsrichtung) in einem statistisch signifikanten Zusammenhang z. B. mit dem Lernerfolg sowie dem Interesse am Thema Quantenphysik stehen [13]. Eine – an sich wünschenswerte – Vergleichsuntersuchung konnte nicht durchgeführt werden, weil es zum Zeitpunkt der Erpro-

bung keine verbreitete Alternative gab und weiterhin die Lernziele des Konzeptes sehr spezifisch sind.

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich der übergeordneten Fragestellungen, die der empirischen Untersuchung zugrunde lagen, vorgestellt. Im Hinblick auf die Ergebnisse zum Lernerfolg ist zu beachten, dass die Unterrichtseinheit statt eines Additums am Ende eines Halb- oder Schuljahres gelehrt wurde und die Probandinnen und Probanden die Tests überwiegend nach dem Notenschluss bzw. den Zeugniskonferenzen bearbeiteten.

#### Lernen die Schülerinnen und Schüler die wichtigsten Inhalte der Unterrichtseinheit zur Einführung in die Quantenphysik?

Vor Beginn des Unterrichts, nach den Schulstunden zu den einzelnen Kapiteln sowie unangekündigt fünf Monate nach der Unterrichtseinheit zur Einführung in die Quantenphysik wurde das Wissen der Probandinnen und Probanden mithilfe teilstandardisierter Fragebögen ermittelt. In diesen Fragebögen wurden primär Items zur halboffenen Beantwortung, zu den zentralen Wesenszügen der Klassischen Physik und Quantenphysik, aber auch Multiple-Choice-Aufgaben verwendet. Darüber hinaus wurden im Anschluss an die Unterrichtseinheit bei einer Zufallsstichprobe mittels teilstandardisierter Interviews weitere Daten zum Wissen über die einzelnen behandelten Themen erhoben.

In dem Vortest wurde das Wissen der Schülerinnen und Schüler zu einigen Inhalten der Unterrichtskonzeption (Wellen, Besitzen der Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ in der Klassischen Physik und zu einigen zentralen Inhalten der Quantenphysik wie die Inexistenz der permanenten Lokalisierung, der notwendige Übergang von Aussagen über Einzelereignisse zu Wahrscheinlichkeitsaussagen, der Unterschied zwischen dem Messen und Besitzen von Eigenschaften am Beispiel der Eigenschaft „Ort“, die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation) ermittelt. In der Regel konnten ausschließlich für die Angaben zu den Beispielen für Wellen (Allgemeinwissen) und/oder für die Multiple-Choice-Aufgaben zur Klassischen Mechanik und/oder Quantenphysik Punkte vergeben werden. Im Durchschnitt erreichten die Probandinnen und Probanden 13% der möglichen Höchstpunktzahl. Die Befunde des Vortests zeigen insgesamt deutlich:

- Die Schülerinnen und Schüler besaßen unabhängig von der Physiknote, dem Fachinteresse, dem Geschlecht sowie der Ausbildungsrichtung vor der Inter-

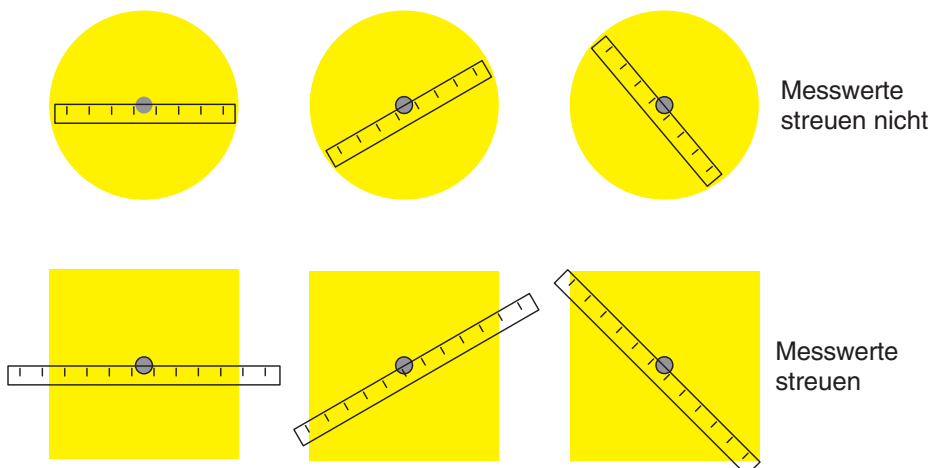


Abb. 4: Messverfahren für die Eigenschaft „Durchmesser“

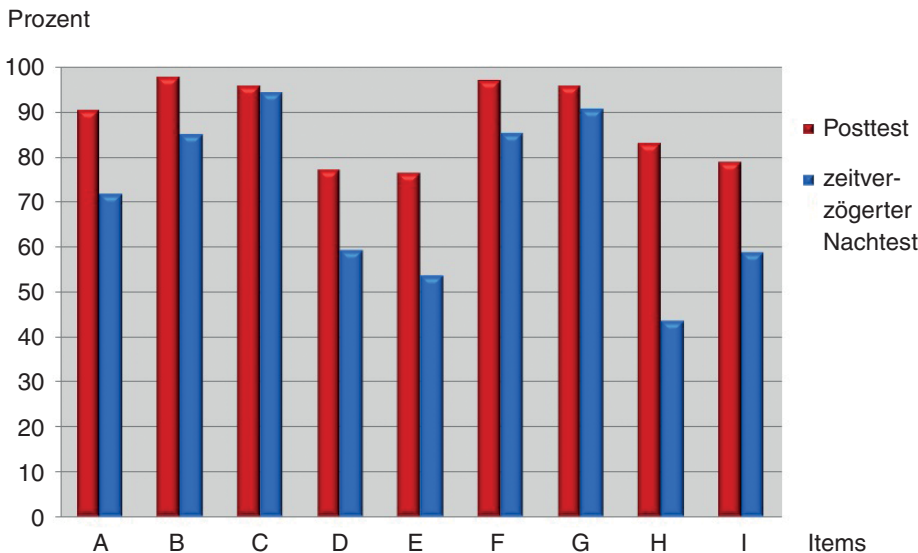


Abb. 5: Prozentualer Anteil der richtigen Antworten in den Posttests und dem zeitverzögerten Nachtest

vention keine fundierten Vorkenntnisse zu den erhobenen Inhalten der Unterrichts-konzeption.

In den Fragebögen nach dem Unterricht zu den einzelnen Kapiteln (Posttests) und dem zeitverzögerten Nachtest fünf Monate nach der gesamten Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* wurde das Wissen beispielsweise bezüglich der folgenden Items zu den Grundlagen der Klassischen Physik und den Wesenszügen der Quantenphysik ermittelt:

- Was versteht man unter Interferenz?
- Multiple-Choice-Aufgabe zum Besitzen der Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ in der Klassischen Physik
- Multiple-Choice-Aufgabe zum Besitzen der Eigenschaften „Ort“ in der Quantenphysik
- Kann man jedem Elektron beim Doppelspaltexperiment eindeutig einen Spalt zuordnen, durch den es die Spaltenebene passiert hat? Begründe deine Antwort!
- Sind in der Quantenphysik Vorhersagen über Einzelereignisse möglich? Begründe deine Antwort an einem Beispiel!
- Multiple-Choice-Aufgabe zur Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster
- Multiple-Choice-Aufgabe zum Unterschied zwischen dem Messen und Besitzen der Eigenschaften „Ort“ in der Quantenphysik
- Was besagt die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation?
- Ist die Vorstellung einer Bahn, auf der sich ein Teilchen bewegt, in der Quantenphysik richtig? Begründe deine Antwort!

Der prozentuale Anteil der richtigen Antworten der Probandinnen und Probanden in den Posttests und dem zeitverzögerten Nachtest ist in Abb. 5 dargestellt.

Alles in allem erzielten die Schülerinnen und Schüler unter Berücksichtigung aller Posttests nach dem Unterricht zu den einzelnen Kapiteln der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* im Durchschnitt 73% der möglichen Höchstpunktzahl, was insgesamt für einen guten unmittelbaren Lernerfolg spricht. Dieser positiv zu bewertende unmittelbare Lernerfolg wurde darüber hinaus durch die mündlichen Befragungen bestätigt. Über den Zeitraum von fünf Monaten nach der Unterrichtseinheit lässt sich erwartungsgemäß ein Wissensrückgang beobachten: Im zeitverzögerten Nachtest erzielten die Probandinnen und Probanden im Durchschnitt 56% der möglichen Höchstpunktzahl, was insgesamt für einen befriedigenden Lernerfolg über die Dauer der Intervention spricht. Alles in allem lässt sich somit feststellen:

- Die Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe haben auf der Grundlage der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* auf einem qualitativen Niveau grundlegende Kenntnisse zu Inhalten der Klassischen Physik (Wellen und Bahnkurve in der Klassischen Physik) sowie der Quantenphysik erworben.
- Die erlernten zentralen Wesenszüge der Quantenphysik sowie wichtige Grundlagen der Klassischen Physik sind den Schülerinnen und Schülern der 10. Jahrgangsstufe über die Dauer der Intervention hinaus bewusst geblieben.

Zur Untersuchung, welche Faktoren in einem statistisch signifikanten Zusammen-

hang mit dem unmittelbaren Lernerfolg bzw. dem überdauernden Wissen, d. h. mit den erreichten Gesamtpunktzahlen in allen Fragebögen während der Intervention bzw. im zeitverzögerten Nachtest (abhängige Variablen) stehen, wurden univariate vierfaktorielle Kovarianzanalysen [14] durchgeführt. Die Ergebnisse (siehe Tab. 1) sowie die Analyse der zugrundeliegenden Korrelationskoeffizienten zeigen, dass zwischen der Physiknote und dem unmittelbaren Lernerfolg bzw. dem überdauernden Wissen ein statistisch höchst signifikanter bzw. statistisch sehr signifikanter positiver Zusammenhang besteht [15]. Das Fachinteresse der Probandinnen und Probanden hingegen ist sowohl für den unmittelbaren Lernerfolg als auch für das überdauernde Wissen nicht von entscheidender Bedeutung. Dies bedeutet, dass auch die Jugendlichen gute Resultate in allen Posttests sowie dem zeitverzögerten Nachtest erlangt haben, deren fachspezifisches Interesse gering resp. mittelmäßig ausgeprägt ist. In Hinsicht auf das überdauernde Wissen besteht darüber hinaus ein statistisch sehr signifikanter positiver Zusammenhang zwischen dem unmittelbaren Lernerfolg und den erreichten Gesamtpunktzahlen im zeitverzögerten Nachtest. Unabhängig von der Physiknote und dem Fachinteresse sowie hinsichtlich des überdauernden Wissens unabhängig von dem unmittelbaren Lernerfolg lassen sich sowohl in Bezug auf den unmittelbaren als auch den langfristigen Lernerfolg keine statistisch signifikanten Kenntnisunterschiede zwischen den Mädchen und Jungen, den Schülerinnen und Schülern der unterschiedlichen Ausbildungsrichtungen sowie mit unterschiedlich ausgeprägtem individuellen Interesse am Thema *Quantenphysik* feststellen. Zudem ist die Interessantheit der Unterrichtseinheit sowohl für den unmittelbaren Lernerfolg als auch das überdauernde Wissen nicht von maßgeblicher Relevanz.

#### Sind die Inhalte der Unterrichtseinheit für die Schülerinnen und Schüler interessant? Welche der Inhalte sind am interessantesten bzw. am uninteressantesten?

Am Ende eines jeden Fragebogens während der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* wurde die Interessantheit der jeweiligen Kapitel ermittelt. Für die Beurteilungen der Jugendlichen zur Interessantheit der einzelnen Kapitel der Unterrichtseinheit ergeben sich jeweils Mittelwerte von  $m < 3,5$  (siehe Abb. 6). Unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Bewertungsskala lässt sich somit feststellen:

- Die Inhalte der einzelnen Kapitel der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* sind für die Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe interessant.

Im letzten Fragebogen während der Intervention und im zeitverzögerten Nachtest wurden zudem die interessantesten und uninteressantesten Inhalte der Unterrichtseinheit erfragt. Aus den nach der absoluten Häufigkeit sortierten Rückmeldungen ergaben sich folgende Reihenfolgen:

#### Interessanteste Inhalte:

- Doppelspaltexperiment
- Wellen
- Elektronen-Skilauf
- Schrödingers Katze
- Verhalten von Quantenobjekten
- Interferenz(muster)
- Unterschiede Klassische Physik – Quantenphysik
- Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation
- alle Themen

#### Uninteressanteste Inhalte:

- Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation
- Wellen
- kein Thema
- Bahnkurve in der Klassischen Physik
- Elektronen-Skilauf
- Schrödingers Katze
- Doppelspaltexperiment
- Präparation

Insgesamt lässt sich somit feststellen:

- Die Inhalte der Kapitel *Das Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen*, *Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen* und *Weitere Merkwürdigkeiten der Quantenphysik* sind für die Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe am interessantesten und die des Kapitels *Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation* am uninteressantesten.

#### Sind die Inhalte der Unterrichtseinheit für die Jugendlichen gut zu erfassen, d.h. aus ihrer Sicht verständlich? Bei welchen Inhalten ergeben sich nach Meinung der Probandinnen und Probanden Verständnisschwierigkeiten?

Am Ende eines jeden Fragebogens während der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* wurde zum einen die Verständlichkeit der jeweiligen Kapitel ermittelt. Zum anderen wurden die Verständnisschwierigkeiten, die sich nach Meinung der Schülerinnen und Schüler

		unmittelbarer Lernerfolg	überdauerndes Wissen
Kovarianten	Physiknote	höchst signifikant	sehr signifikant
	Fachinteresse	nicht signifikant	nicht signifikant
	unmittelbarer Lernerfolg	–	sehr signifikant
Faktoren	Geschlecht	nicht signifikant	nicht signifikant
	Ausbildungsrichtung	nicht signifikant	nicht signifikant
	Interesse am Thema <i>Quantenphysik</i>	nicht signifikant	nicht signifikant
	Interessantheit der Unterrichtseinheit	nicht signifikant	nicht signifikant

Tab. 1: Ergebnisse der Kovarianzanalysen

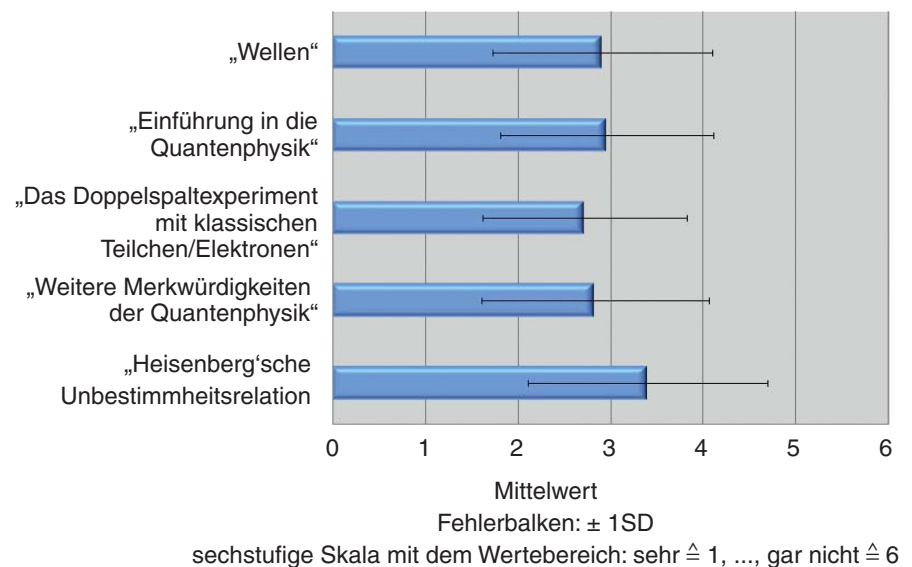


Abb. 6: Interessantheit der Kapitel

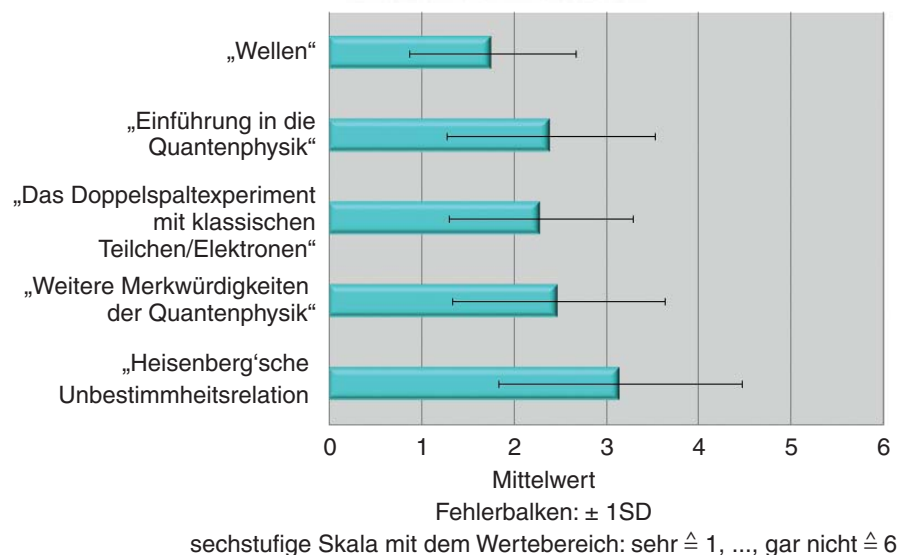


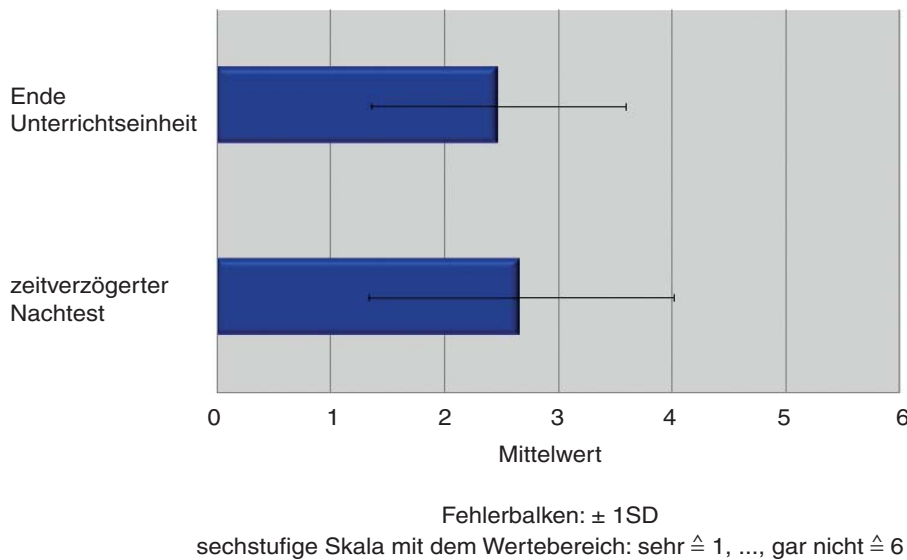
Abb. 7: Verständlichkeit der Kapitel

während des Unterrichts zu den einzelnen Themen ergeben haben, erfragt.

Für die Beurteilungen der Jugendlichen zur Verständlichkeit der einzelnen Kapitel der Unterrichtseinheit ergeben sich jeweils Mittelwerte von  $m < 3,5$  (siehe Abb. 7). Un-

ter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Bewertungsskala lässt sich somit feststellen:

- Die Inhalte der einzelnen Kapitel der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* sind für die Schülerinnen



**Abb. 8:** Interesse am Thema *Quantenphysik*

und Schüler der 10. Jahrgangsstufe gut zu erfassen, d.h. aus ihrer Sicht verständlich.

Zu Verständnisschwierigkeiten im Unterricht liegen allgemein wenige Rückmeldungen vor. Die meisten jedoch dahin gehend, dass die Jugendlichen „keine Schwierigkeiten“ hatten und „alles gut verständlich“ war. Diesbezüglich wurden vielfach insbesondere der Schülertext, die Experimente, die Filme und das Simulationsprogramm zum Doppelspaltexperiment sowie die Cartoonserien zum *Ersten Elektronen-Ski*lauf und *Zweiten Elektronen-Ski*lauf mit Liveübertragung oder auch der Exkurs zu „Schrödingers Katze“ sehr positiv hervorgehoben. Das Kapitel *Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation* hingegen wurde öfter als „etwas schwer zu verstehen“ bzw. „schwerer verständlich als die anderen Themen“ beurteilt. Insgesamt ist somit festzustellen:

- In der Regel ergaben sich nach Meinung der Probandinnen und Probanden nur vereinzelt Verständnisschwierigkeiten hinsichtlich der Inhalte der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik*. Die meisten liegen das Kapitel *Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation* betreffend vor.

### Interessieren sich die Schülerinnen und Schüler für das Thema *Quantenphysik*, einem Teilgebiet der *Modernen Physik*?

Am Ende und fünf Monate nach der Unterrichtseinheit zur *Einführung in die Quantenphysik* wurde das Interesse der Schülerinnen und Schüler am Thema *Quantenphysik* erhoben. Des Weiteren sollten die Probandinnen und Probanden die Frage „Möcht-

test Du gerne mehr über die *Quantenphysik* erfahren?“ mit den Antwortmöglichkeiten „Ja“ oder „Nein“ einschließlich einer Begründung beantworten.

Für die Angaben der Probandinnen und Probanden zum Interesse am Thema *Quantenphysik* im letzten Posttest am Ende der Unterrichtseinheit und im zeitverzögerten Nachtest ergaben sich jeweils Mittelwerte von  $m < 3,5$  (siehe Abb. 8).

Das positiv zu bewertende Interesse der Schülerinnen und Schüler am Thema *Quantenphysik* zeigt sich darüber hinaus auch im Hinblick auf die Rückmeldungen zu der Frage „Möchtest Du gerne mehr über die *Quantenphysik* erfahren?“. Sowohl am Ende als auch fünf Monate nach der Intervention beantwortete die Mehrheit (55,3% bzw. 57,1%) der Probandinnen und Probanden diese Frage mit „Ja“. Gründe für das weiter bestehende Interesse waren unter anderem, dass das Thema als „spannend“, „modern/aktuell“, „faszinierend“ und „interessanter als die *Klassische Physik*“ angesehen wurde. In diesem Zusammenhang wurden vor allem das andersartige Verhalten der *Quantenobjekte* bzw. die Unterschiede zwischen der *Klassischen Physik* und *Quantenphysik*, das Interesse am Verhalten und den Eigenschaften von *Mikroobjekten*, die Bedeutung der *Quantenphysik* für die Zukunft, Forschung und Technologie sowie die positive Beurteilung des Unterrichts einschließlich der Materialien hervorgehoben. Alles in allem ist folglich festzustellen:

- Die Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe interessieren sich für das Thema *Quantenphysik*.

Die Ergebnisse der univariaten dreifaktoriellen Kovarianzanalysen (Kovariaten:

Interesse am Fach *Physik* und *Physiknote*, Faktoren: Geschlecht, Ausbildungsrichtung und Interessantheit der Unterrichtseinheit) sowie die Analyse der zugrundeliegenden Korrelationskoeffizienten zeigen, dass sowohl im Anschluss an die Unterrichtseinheit als auch zum Zeitpunkt des zeitverzögerten Nachtests (abhängige Variablen) zwischen dem Fachinteresse und dem Interesse am Thema *Quantenphysik* ein statistisch sehr signifikanter positiver Zusammenhang besteht. Die *Physiknote* der Probandinnen und Probanden hingegen ist für die Ausprägung des Interesses an der *Quantenphysik* zu beiden Erhebungszeitpunkten nicht von entscheidender Bedeutung. Dies bedeutet, dass zu beiden Erhebungszeitpunkten auch die Jugendlichen Interesse an diesem Teilgebiet der *Modernen Physik* bekundet haben, deren Leistung nicht als übermäßig einzustufen ist. Unabhängig von dem Fachinteresse und der *Physiknote* lassen sich zum einen direkt im Anschluss an den Unterricht und zum anderen nach fünf Monaten keine statistisch signifikanten Interessenunterschiede sowohl zwischen den Mädchen und Jungen als auch den Schülerinnen und Schülern der unterschiedlichen Ausbildungsrichtungen feststellen. Folglich lässt sich festhalten, dass sich zum einen die Mädchen wie auch die Jungen und zum anderen die Jugendlichen der verschiedenen Zweige gleichermaßen für die *Quantenphysik* interessieren und auch überdauernd interessierten. Zwischen der Interessantheit der Unterrichtseinheit und dem Interesse am Thema *Quantenphysik* besteht sowohl am Ende der Intervention als auch zum Zeitpunkt des zeitverzögerten Nachtests jeweils ein statistisch höchst signifikanter positiver Zusammenhang.

### Wie ist das Interesse der Schülerinnen und Schüler an der *Quantenphysik* im Vergleich zu Gebieten der *Klassischen Physik* einzuordnen?

Im Hinblick darauf, wie das Interesse der Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe an der *Quantenphysik* im Vergleich zu Themen der *Klassischen Physik* eingeordnet werden kann, wurde im zeitverzögerten Nachtest zusätzlich das Interesse an den Teilgebieten *Mechanik*, *Optik*, *Wärmelehre* sowie *Elektrizitätslehre* und *Magnetismus* ermittelt. Für die Angaben der Probandinnen und Probanden zum Interesse an den verschiedenen Themen der *Klassischen Physik* und am Thema *Quantenphysik* im zeitverzögerten Nachtest ergaben sich die in Abbildung 9 dargestellten



Mittelwerte. Darüber hinaus waren im letzten Fragebogen am Ende der Intervention unter „Sonstige Bemerkungen“ bzw. als Begründung für das weiter bestehende Interesse an der Quantenphysik im zeitverzögerten Nachtest beispielsweise die folgenden Aussagen zu lesen: „Das Ganze war viel interessanter als die gesamte 9. Klasse in Physik.“, „[...] weil es das interessanteste Thema in Physik war (bis jetzt). Es ist spannender als Elektrizitätslehre usw.“. Alles in allem verdeutlichen diese Ergebnisse somit:

- Das Interesse der Schülerinnen und Schüler der 10. Jahrgangsstufe am Thema *Quantenphysik*, einem Teilbereich der Modernen Physik, ist größer als an Teilgebieten der Klassischen Physik.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass im Hinblick auf ein grundlegendes Verständnis bezüglich zentraler Inhalte der Quantenmechanik ein erfolgreicher Einstieg in die Quantenphysik bereits in der 10. Jahrgangsstufe möglich ist und diese anspruchsvolle Thematik bei Schülerinnen und Schülern dieser Jahrgangsstufe auf Interesse stößt. Gemäß den Resultaten empirischen Untersuchung lässt sich konstatieren, dass die Probandinnen und Probanden auf der Grundlage der Unterrichtskonzeption zur *Einführung in die Quantenphysik* auf einem qualitativen Niveau grundlegende Kenntnisse zu Inhalten der Klassischen Physik (Wellen und Bahnkurve in der Klassischen Physik) sowie der Quantenphysik erworben haben und die Inhalte der Unterrichtseinheit als interessant und verständlich bewertet wurden. Die positiven Ergebnisse hinsichtlich der Interessanztheit und Verständlichkeit der Inhalte der Unterrichtskonzeption sowie bezüglich des Interesses an der Quantenphysik werden darüber hinaus durch die folgenden Zitate unterstrichen:

- „Mit der Quantenphysik lernt man die Physik mit ganz anderen Augen kennen.“
- „... Wer sagt, er hat die Quantenmechanik verstanden, der lügt!“  $\Rightarrow$  es ist jedoch anzumerken, dass der Unterricht interessant und verständlich gestaltet wurde. Sehr gut!“
- „Die Quantenphysik ist in einigen Punkten sehr verwirrend. Aber auch irgendwie spannend und interessanter als die ‚normale‘ Physik!“

Da in der Unterrichtskonzeption für die 10. Jahrgangsstufe die begriffliche Struktur des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenphysik für die Oberstufe verwen-

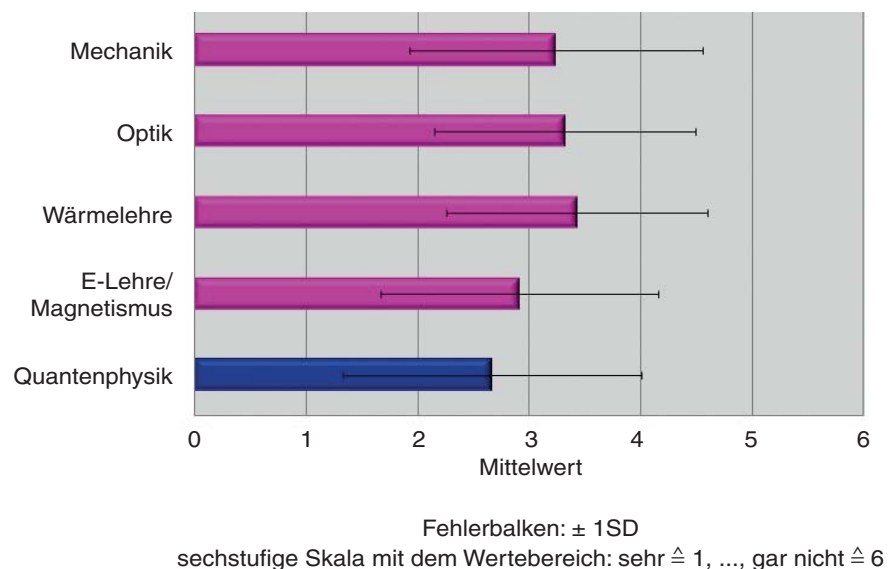


Abb. 9: Themenspezifisches Interesse an Teilgebieten der Physik

det wird, ist es möglich, dass im weiteren Verlauf des Schulunterrichts in der Oberstufe nach der gleichen Konzeption weiterführende Inhalte der Quantenphysik deutlich vertiefter z. B. auch unter Berücksichtigung des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik vermittelt werden können.

#### Literatur

- [1] Aufrufbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/ifdn/physik/milq>
- [2] R. Müller, H. Wiesner (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. In: *Physik in der Schule* 38. S. 126 – 134
- [3] R. Müller, H. Wiesner (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: *American Journal of Physics* 70, S. 200-209
- [4] Dieser Wesenszug der Quantentheorie ist besonders klar herausgearbeitet in: L. Eisenbud. *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York u.a., 1971
- [5] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands (2007). *Feynman Vorlesungen über Physik: Band III: Quantenmechanik. Definitive Edition* (5., verbesserte Aufl.). Oldenbourg, München
- [6] R. Müller (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Logos, Berlin
- [7] B. Schorn, H. Wiesner (2008). *Die Quantenphysik in der Sekundarstufe I*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 6/57, S. 26-34
- [8] [http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/quantenphysik\\_sek1/index.html](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/quantenphysik_sek1/index.html)
- [9] Film zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen: <http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/movie.html>
- [10] Simulationsprogramm zum Doppelspalt-

versuch: [http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/doppelspalt/index.html](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/doppelspalt/index.html)

[11] S. Bauer (2009). *Cartoons im Physikunterricht. Zulassungsarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik, LMU München.*

[12] Filmausschnitt „What the bleep do we (k)now?“. <https://www.youtube.com/watch?v=3ohjOltaO6Y&feature=related>

[13] B. Schorn (2014). *Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe*. Dissertation, Technische Universität Dresden

[14] Bei einer Kovarianzanalyse werden zunächst die Zusammenhänge zwischen den Kovariaten (auch: Kontrollvariablen) und der abhängigen Variablen ermittelt. Diese werden für die weitere Untersuchung herauspartialisiert und die Zusammenhänge der Faktoren mit der abhängigen Variablen sodann unabhängig von den Zusammenhängen der Kovariaten und der abhängigen Variable untersucht.

[15] Klassifizierung der Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$  bei einem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ :  $p > 0,05$ : statistisch nicht signifikant;  $p \leq 0,05$ : statistisch signifikant;  $p \leq 0,01$ : statistisch sehr signifikant;  $p \leq 0,001$ : statistisch höchst signifikant.

#### Anschriften der Verfasser

Prof. i.R. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München.

E-Mail: [hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de](mailto:hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de)

Dr. Bernadette Schorn, Institut für Kern- und Teilchenphysik, Technische Universität Dresden, Zellescher Weg 19, 01069 Dresden, E-Mail: [bernadette.schorn@tu-dresden.de](mailto:bernadette.schorn@tu-dresden.de)