

Quantenphysik in Schule und Hochschule

Gesche Pospiech, Matthias Schöne

TU Dresden, Professur Didaktik der Physik, 01062 Dresden
gesche.pospiech@tu-dresden.de, matthiasschoene@web.de

Kurzfassung

Quantenphysik ist ein Gebiet der Physik, das als besonders schwer zu vermitteln gilt, dem aber auch besondere Faszination und eine außergewöhnliche Rolle für die Herausbildung eines physikalischen Weltbildes zugesprochen wird. Jedoch werden die notwendigen mathematischen Methoden in aller Regel für die Schule als unzugänglich angesehen. Daher muss man sich auf überwiegend qualitative Begriffsbildung beschränken. In diesem Artikel werden die Begriffe der Unbestimmtheit, und Verschränkung als zentrale Konzepte herausgearbeitet. Dies wird abgeglichen mit den Vorgaben in den Lehrplänen der Bundesländer, den Auffassungen von Lehramtsstudierenden zum Unterricht über Quantenphysik und mit einer exemplarischen Bestandsaufnahme der Lehre zur Quantenphysik in der Lehramtsausbildung.

1 Einführung

Die drei Begriffe Quantenphysik, Quantentheorie und Quantenmechanik (die nicht immer strikt unterschieden werden) umschreiben Aspekte der wichtigsten und grundlegendsten physikalischen Theorie, die uns heute zur Beschreibung der Welt zur Verfügung steht. Dabei ist sie charakterisiert durch ihre mathematische Struktur, die manchmal die einzig feste und sichere Basis für unterschiedliche Aussagen über Quantenphysik zu sein scheint. Zusätzlich umfasst sie wichtige Anwendungen, die heute jeder direkt oder indirekt in zahlreichen Alltagsgeräten nutzt. Dennoch wird sie in der Öffentlichkeit als sehr abstrakt und irgendwie geheimnisumwittert wahrgenommen. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass sie die Welt anders als die klassische Physik beschreibt und demnach ein davon völlig verschiedenes Denk- und Begriffssystem braucht. Dies hat seit ihrer Entdeckung weltanschaulich und philosophisch geprägte Diskussionen und Auseinandersetzungen angeregt.

Trotz oder wegen dieser erheblichen Komplikationen gilt sie als unabdingbar für eine physikalische Grundbildung sowohl an der Schule als auch an der Universität: So unterschiedlich die Lehrpläne der Bundesländer in Zeiten des Föderalismus auch sein mögen: alle enthalten im Fach Physik die Quantentheorie in einem ähnlichen Umfang mit sehr ähnlichen Begrifflichkeiten; und auch jedes Physikstudium umfasst mindestens eine experimentelle und mindestens eine theoretische Vorlesung, die der Quantentheorie oder Quantenphysik gewidmet ist.

Die Abstraktheit der Quantentheorie, vor allem die begrifflichen Unterschiede zur klassischen Physik,

bedingen Verständnis- und damit verbunden auch Vermittlungsprobleme, die spezifisch für die Quantenphysik sind. Diese Probleme lassen sich bis in die ersten Tage der Quantentheorie zurückverfolgen - der paradigmatische Widerstreit zwischen Einstein und Bohr, kulminierend in dem Artikel aus dem Jahr 1935 von Einstein, Podolski und Rosen (EPR), [10], Bohrs Antwort hierauf, [4], und der "Generalbeichte" Schrödingers, [27]. Dieser letztgenannte Artikel ist (neben EPR) einer der wenigen Artikel zu Grundlagen und Interpretation der Quantentheorie aus der Zeit vor 1982, die heute noch in jedem Wort "gültig" sind. Zu diesem Zeitpunkt war auf dieser Ebene alles gesagt und nichts gelöst. Noch 1952 konnte Schrödinger unwidersprochen sagen:

"Wir werden niemals Experimente mit nur einem einzelnen Elektron, Atom oder Molekül durchführen können. In Gedankenexperimenten können wir das vielleicht annehmen. Aber das führt zu geradezu lächerlichen Konsequenzen."

Die nach dem zweiten Weltkrieg einsetzende rasante technologische Entwicklung öffnete das Tor für weiter führende Experimente und damit die aktuellen Erkenntnisse. Hier bedeutet das Jahr 1982, (wenn man eine feste Jahreszahl nennen möchte.) eine Zäsur in der Entwicklung des Verständnisses der Quantentheorie. Natürlich haben die Aspect-Versuche [1], die in diesem Jahr durchgeführt wurden, ihre Vorgeschichte in verschiedenen theoretischen Arbeiten, (s. z.B. [2, 7] und auch ihre Nachwirkungen, beispielsweise in den experimentellen wie auch theoretischen Arbeiten verschiedener Arbeitsgruppen, (s.z.B. [5, 8, 18, 23]). Daher betrachte ich die Aspect-Versuche als den entscheidenden Wende-

punkt, der zu einer zunehmenden Klärung noch offener Punkte im Verständnis beitrug, vor allem zur Abgrenzung zwischen klassischem Bereich und Quantenwelt (s.z.B. [11]), zum Verständnis des Messprozesses (s.z.B. [13, 15]) und vor allem eine Einschränkung von Interpretationsmöglichkeiten. Nicht ohne Grund spricht man in diesem Zusammenhang auch von "experimenteller Philosophie". Nichtsdestotrotz spielen v.a. wenn es um die Interpretation geht, immer auch persönliche Auffassungen über Physik für das Lehren und Lernen der Quantentheorie eine gewisse Rolle. Dennoch sollte sich mittlerweile ein Konsens finden lassen, welche Konzepte der Quantentheorie, gerade im Hinblick auf die schulische Bildung - besonders wesentlich, relevant und vor allem auch vermittelbar sind und wie diese Vermittlung am besten realisiert werden kann. Eine Schlüsselrolle spielen hierbei die Lehrer und vor allem auch die künftigen Lehrer, d.h. die Lehramtsausbildung in Quantentheorie.

2 Zentrale Begriffe der Quantentheorie

Ehe nun die aktuelle Situation in der Vermittlung der Quantentheorie analysiert wird, sollen die Grundlagen aus der Perspektive der Vermittlung näher dargestellt werden.

2.1 Kriterien für die Auswahl der Konzepte

Jegliche Auswahl der zu vermittelnden Konzepte muss - besonders im Hinblick auf schulischen Unterricht - unter Berücksichtigung der didaktischen Rekonstruktion - mehrere Aspekte berücksichtigen. Das wesentliche Kriterium muss die fachliche Korrektheit sein und die Erweiterbarkeit des erworbenen Wissens bei weiterem Lernen. Dies impliziert - gerade in einem dynamischen Wissensgebiet - zugleich ein Gleichgewicht zwischen Aktualität und Gesicherheit des Wissens; es sollte ein Konsens in der wissenschaftlichen Gemeinschaft bestehen. Hierzu gehört auch eine gewisse Einigkeit über Diskussionswürdigkeit.

Ferner müssen die in Frage kommenden Inhalte die Fähigkeiten und Interessen der Schüler berücksichtigen. Gerade in Quantenphysik erwarten die Lehrpläne darüber hinaus einen Beitrag des Physikunterrichts für Allgemeinbildung und Herausbildung eines Weltbildes; er soll zum "Orientierungswissen" der Jugendlichen beitragen. Dies berücksichtigt, dass sich nicht einmal der Leistungskurs Physik ausschließlich an künftige Physiker/ Naturwissenschaftler richtet. Besonders im Grundkurs Physik steht die physikalische Allgemeinbildung im Vordergrund. Das Orientierungswissen spiegelt sich vor allem in der Deutungsdebatte, dem Verständnis darüber, weshalb es gerade in der Quantentheorie eine Debatte gab und bis heute gibt, in Fragen zur Interpretation, in der Formulierung sperriger Sachverhalte. Das Verfügungswissen lässt sich auf anwendungsbezogene Themen beziehen wie Laser und die

Nutzung der Quantenphysik in modernen Geräten, wie Handy etc.

2.2 Kernbegriffe der Quantentheorie

Daher ist es besonders wichtig, die zentralen Konzepte möglichst rasch und zentral auf möglichst elementarer Ebene herauszuschälen. Zwar macht der mathematische Apparat den unumstrittenen Teil der Quantentheorie aus, der schulische Unterricht kann dies aber nicht ohne weiteres nachbilden. Vielmehr muss er von Phänomenen und Experimenten ausgehen, die an das Vorwissen der Schülerinnen anknüpfen und damit Verankerungspunkte liefern.

2.2.1 Superposition

Ein guter Ausgangspunkt ist die Beobachtung von Interferenzen (in der Optik), beispielsweise im Doppelspaltexperiment. Dieser phänomenologische Zugang, verweist auf Strukturen, die sich auch mathematisch beschreiben lassen. Die Interferenzen lassen sich durch Überlagerungen, (Superpositionen) zunächst physikalisch modellieren und in einem zweiten Schritt durch die Addition von Zuständen auch mathematisch modellieren. Zeilinger betont: *"Tatsächlich sind alle Paradoxa der Quantentheorie auf Interferenz zurückzuführen oder allgemeiner auf die Gültigkeit des Superpositionsprinzips für Amplituden."*, [28]. Dirac schrieb allerdings bereits 1927: *"the superposition that occurs in quantum mechanics is of an essentially different nature from any occurring in the classical theory"* Strukturell bedeutet dies, dass die mathematisch am besten zur Abbildung der beobachteten Phänomene geeignete Struktur ein Hilbertraum ist. Hier ist die Überlagerung von Vektoren wieder ein Vektor, d.h. die Überlagerung von (reinen) Zuständen ist wieder ein (reiner) Zustand. Andererseits wird die Konstruktion des Hilbertraums in dieser Form nicht in der klassischen Physik eingesetzt.

2.2.2 Unbestimmtheit

Auch der zweite zentrale Begriff, die Unbestimmtheit, beruht auf einer phänomenologischen Basis: Experimente wie das bekannte Beispiel eines Silberatomstrahls durch zwei gegeneinander gekreuzte Stern-Gerlach Apparate, zeigen deutlich ein nicht-klassisches Phänomen, die Unbestimmtheit. Auch ihre Modellierung ist verträglich mit der Hilbertraumstruktur: Ein (reiner) Zustand ist ein eindimensionaler Unterraum des (für das Objekt) relevanten Hilbertraums. Dieser Unterraum kann in verschiedenen Basen dargestellt werden. Wählt man als mögliche Basen für eine Darstellung beispielsweise die Basen nicht-kommutierender Observablen, wird die Unbestimmtheit ganz allgemein sichtbar: Es lassen sich Messwerte nicht fest zuordnen. Denn Messung bedeutet die Auswahl einer Observablen, i.e. den Übergang von der koordinatenfreien Darstellung zu einer koordinatengebundenen Darstellung. Damit implizieren die grundlegenden Eigenschaften

einer Darstellung von Zuständen in einem Hilbertraum bereits zentrale, und vor allem nicht klassische Eigenschaften von einzelnen Quantenobjekten.

2.2.3 Verschränkung

Eine weitere nicht-klassische Eigenschaft ergibt sich, wenn Quantensysteme aus mehreren Quantenobjekten zusammengesetzt werden. Die geeignete mathematische Struktur ist das Tensorprodukt von Hilberträumen. Das damit zusammenhängende hervorstechende physikalische Phänomen ist die Verschränkung, die definitiv nicht mehr klassisch zu erklären ist. Das schlagendste Beispiel hierfür ist die Realisierung der GHZ-Zustände aus drei miteinander gekoppelten (verschränkten) Photonen, [23]. Zwar ist dieses Gesamtsystem so konstruiert, dass es in einer physikalischen Größe determiniert ist, aber dennoch lassen sich den einzelnen Teilen des Quantensystems keine festen Werte zuordnen:

“Das Neue an der quantenmechanischen Situation ist, dass gemeinsame Eigenschaften aller drei Photonen sehr genau festgelegt werden sein können, ohne dass ein einzelnes Photon für sich wohldefinierte Eigenschaften besitzt.”, [28].

2.2.4 Schrödingergleichung und Messprozess

Wenn nun diese Unterschiede zur klassischen Physik aus einer experimentellen Basis entwickelt werden können, so bleibt die Frage, was die Vermittlung der Quantentheorie so schwierig macht.

Die zentrale Basis der Quantentheorie ist der mathematische Apparat. Neben der Hilbertraum-Formulierung werden in der Regel Berechnungen über Quantenobjekte mit Hilfe der Schrödingergleichung durchgeführt. Bei einem gegebenen Anfangszustand ist die Lösung und damit die Zeitentwicklung eindeutig bestimmt und streng deterministisch. Allerdings ist dieses Resultat über die zeitliche Entwicklung der Zustände von Quantenobjekten nicht direkt beobachtbar. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass (im allgemeinen) der Anfangszustand nicht bekannt ist, zum anderen kann man einen Grund darin sehen, dass die Psi-Funktion im Raum der komplexen Zahlen lebt. Damit bewegt man sich auf zwei verschiedenen Aussageebenen: auf einer ontischen Ebene, weil mathematische Aussagen über ein existierendes Quantenobjekt gemacht werden, die aber nicht überprüft (gewusst) werden können. Das Wissen liegt auf der epistemischen Ebene. Die dazu erforderliche Kenntnis über die Quantenobjekte erhält man aber nur in einem Messprozess. Dessen Ergebnisse sind aber - das zeigt die Erfahrung - zufällig, und Einzelergebnisse sind nicht vorhersagbar.

2.3 Interpretationsebenen der Quantentheorie

Im Zentrum jeder Debatte über die Interpretation der Quantentheorie steht der Messprozess. Probleme im Verständnis der Quantentheorie (i.e. oft des Messprozesses) sind oft damit verbunden, dass man nicht

unterscheidet, ob eine Aussage über das Quantenobjekt oder über Messungen am Quantenobjekt getroffen wird. In der klassischen Physik ist diese Unterscheidung nicht notwendig, in der Quantenphysik aber entscheidend, da die ontische Ebene streng deterministisch, die epistemische aber durch den Zufall charakterisiert ist. Daher hat eine konsequente Unterscheidung zwischen ontischer und epistemischer Ebene eine große Bedeutung für die Vermittlung der Quantentheorie. Erst die deutliche Unterscheidung zwischen diesen beiden Ebenen führt zu klaren Konzepten. Zwar beruhen die zentralen Begriffe Überlagerung (Superpositionsprinzip), Unbestimmtheit und die Verschränkung strikt auf einer mathematischen Grundlage. Sie spiegeln alle “merkwürdigen” Phänomene (Doppelspalt, Welcher Weg Information, EPR-Experimente, ...). Diese objektive mathematische Beschreibung scheint es überflüssig zu machen, die unterschiedlichen Bezugsebenen - Objekt an sich oder Messung am Objekt - zu verdeutlichen. Aber erst eine explizite Unterscheidung erlaubt den Lernenden widerspruchsfrei zu argumentieren und die Aussagen der Quantentheorie auf der Basis der jeweils eigenen Grundüberzeugungen zu analysieren. Daher muss der Lehrende immer die jeweilige Beschreibung- und Argumentationsebene deutlich machen. Vor allem muss er Stellung beziehen, welchen Schwerpunkt er setzt, damit die Lernenden nicht die Ebenen vermischen.

Mögliche Grundüberzeugungen sind:

epistemische Haltung: Ich weiß nur, was ich gemessen habe. Meine Aussagen sollen sich nur auf die gemessenen Größen beziehen. “Hypothesen non fingo”

ontische Haltung: Was meinen diese Messungen für das “Wesen der Natur”? dafür, “..was die Welt im Innersten zusammenhält”? Hier wird man oft Formulierungen darüber finden, was man <nicht> wissen oder sagen kann.

Beide Temperamente (Typen) finden sich seit der Entdeckung der Quantentheorie unter Lehrenden wie unter Lernenden. Diese Unterschiede klar benennen und sich damit positionieren zu können, ist zentral für eine Verständigung. Wichtig ist, dass beide Positionen möglich sind. Es muss allerdings klar kommuniziert werden,

1. dass es diese beiden Ebenen gibt,
2. dass sie in der klassischen Physik zusammenfallen,
3. auf welche man sich in der Beschreibung der Quantentheorie gerade bezieht.

Physiker tendieren meist eher zu epistemischen Seite: nur was gemessen ist, ist real. Dieser Position entspricht beispielsweise die Argumentation Bohrs. Primas bringt dies auf den Punkt:

“Quantum theory is well established only in its epistemic formulation.”, [24, S. 311]

“An ontic description of a system can give rise to many different epistemic descriptions mutually excluding each other.” [24, S. 319]

Ein weiteres Beispiel für die notwendige Differenzierung zwischen ontisch und epistemisch bietet der “Welle-Teilchen-Dualismus”, wie er sich oft in Lehrbüchern findet.

“Ein Elektron ist weder Welle noch Teilchen. Es ist ein physikalisches Objekt, welches sowohl Welleneigenschaften als auch Teilcheneigenschaften zeigen kann.” [22]

Die Unterscheidung zwischen ontischer und epistemischer Ebene ist besonders wichtig für die Unbestimmtheit:

„Thus the more accurately one of the variables q, p has a definite value the less accurately the other has a definite value.“ [9, S. 98]

“In der Quantenmechanik gibt es den Begriff der Bahn eines Teilchens nicht. Dies ist der Inhalt des Unbestimmtheitsprinzips..... und hat somit negativen Inhalt.” [16, S. 2]

“Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation besagt, dass zwei nicht-vertauschende Observable nicht gleichzeitig scharf gemessen werden können.” [25, S. 272]

Wie diese miteinander in Beziehung stehen, wird in folgender Formulierung deutlich:

“In der Quantenmechanik sind also Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons Größen, die nicht gleichzeitig genau gemessen werden können, d.h. sie können nicht gleichzeitig bestimmte Werte haben. Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons sind Größen, die nicht gleichzeitig existieren.”, [16, S.4].

Die Klarheit der Formulierung von Landau/Lifschitz fehlt aber in vielen Büchern oder wird vermieden.

2.3.1 Unbestimmtheit und Unbestimmtheitsrelation

Die Unterscheidung von ontisch oder epistemisch lässt sich besonders eindrücklich an der Unbestimmtheit illustrieren. Es ist zwischen dem (ontischen) Phänomen Unbestimmtheit, d.h. dem Unbestimmtheitsprinzip, und seiner Quantifizierung, den Unbestimmtheitsrelationen für nicht-kommutierende Operatoren, zu unterscheiden. Die Unbestimmtheit, die sich mathematisch in der Möglichkeit spiegelt, unterschiedliche Basen für eine Darstellung gegebener physikalischer Zustände zu finden, ist eine “Nichtexistenzaussage”. Sie bedeutet die Nichtexistenz fester Eigenschaften bei einem Quantenobjekt. Die Unbestimmtheitsrelation bedeutet dann das Wunder, dass man nach einer Messung verblüffend sichere Auskunft über mögliche Streuungen von Messwerten erhalten kann. Das Produkt der Streuung von Ort und Impuls wird nach unten durch eine so kleine Größe wie das Wirkungsquantum abgeschätzt. Man kann gar nicht deutlich genug betonen, dass

1. die Unbestimmtheit wirklich die Nichtexistenz von Werten für Größen bedeutet oder sogar, “dass diese Größen nicht existieren.” eindeutig eine Aussage auf der ontischen Ebene
2. es daher ein Wunder ist, dass man bei dieser Nichtexistenz überhaupt die Streuung von Messwerten angeben kann, eine Aussage auf epistemischer Ebene
3. dass diese Streuungen so klein sind.

Diese Unterscheidung wird aber in den meisten Lehrbüchern nicht klar herausgearbeitet, was meist daran liegt, dass nicht zwischen den Ebenen unterschieden wird. Oft findet man Formulierungen wie: “Dies ist grundsätzlicher Natur” oder ähnliches, ohne dass genauer ausgeführt wird, worin dieses “grundsätzliche” besteht. Meist wird nur die epistemische Ebene angesprochen, manchmal ist unklar, ob auch die ontische Ebene berücksichtigt wird. In nahezu allen Lehrplänen für die Schule wird aber verlangt, diese Problematik zu behandeln, indem eine Diskussion bezüglich des Weltbildes im Sinne eines Orientierungswissen vorgesehen ist.

Da man nun in eine Vorlesung über Quantentheorie nicht eine Philosophievorlesung einbetten kann, ist die Minimal-Lösung, bei jeder Argumentation über Unbestimmtheit oder den Messprozess jeweils die Bezugsebene deutlich zu machen.

3 Quantenphysik in Schulbüchern und Lehrplänen

Die durch die Experimente und Techniken der letzten 30 Jahre neu gewonnene Klarheit erfordert ein Neudurchdenken der wichtigsten Konzepte und Begriffe der Vermittlung und ihrer Schwerpunkte. Für die Definition etablierter Lehre ist diese Zeitspanne noch sehr kurz. Jedoch gibt es neuere fachdidaktische Ansätze, [19, 20, 26]. Im folgenden soll untersucht werden, inwieweit diese bereits in die Schulrealität vorgedrungen sind.

Künftige Lehrer werden maßgeblich durch ihre eigenen Schulerfahrungen beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind die im Unterricht selber erlernten Inhalte und die dabei erworbenen Eindrücke, die Kenntnisse des universitären Studiums, bei den jungen Lehrern (noch) die Lehrpläne und vor allem auch die eigenen Vorstellungen zum Lehren und Lernen von Physik bei. Dies wird nun für das Gebiet der Quantenphysik näher beleuchtet werden.

3.1 Typische Lehrgänge

Die Schulerfahrungen speisen sich in erster Linie durch die erfahrenen Lehrgänge in Grundkurs oder Leistungskurs. Die “Standardinhalte” eines Lehrgangs zur Quantenphysik starten immer noch oft mit dem Photoeffekt als einem pseudohistorischen Zugang, [6, S. 83]. Folgende typische Schwerpunkte sind oft zu finden:

- Quantenphysik als Theorie für Mikroobjekte
- Welle-Teilchen Dualismus (in unterschiedlichen Ausprägungen)
 - Photoeffekt
 - Comptoneffekt (meist Leistungskurs)
 - Röntgenstrahlung
- Schrödingergleichung
 - Potentialtopf
- Unschärfe- / Unbestimmtheitsrelation
 - Herleitung am Einzel-/ Doppelspalt
 - Komplementarität
- Messprozess
 - Statistische/ Ensemble Deutung
 - Unkontrollierte Störung

Diese gewohnten Pfade spiegeln sich in gewohnten Schemata und Ausdrucksformen. Wie Levy-Leblond formulierte [17, S. 496]:

“Most elementary textbooks and popularization works about quantum physics remain plagued by archaic wordings and formulations.”

Es werden in der Nachfolge der Debatte aus der Anfangszeit der Quantentheorie viele altvertraute Begriffe, wie z.B. “Mikroobjekte” verwendet, wobei sich allerdings in neueren Büchern oft ihr Bedeutungsgehalt zumindest teilweise bereits geändert hat. Dies erleichtert allerdings nicht gerade das Lernen und Verstehen. Die Bedeutungsverschiebung lässt sich besonders gut am Begriff des “Welle-Teilchen-Dualismus” illustrieren. Die Varianten des Begriffsgehalts changiert zwischen “Weder – noch, sondern ein Drittes” oder “Sowohl – als auch” oder “Mal so – mal so (je nach Experiment)”. Ähnliches gilt für die Unbestimmtheitsrelation. Diese beiden Kernbegriffe sind aber nur zwei Beispiele für weitere Begrifflichkeiten und Konzepte, die eine grundlegende Umdeutung erfahren haben, auch wenn die Worte selber die gleichen oder ähnlich geblieben sind. Dazu gehören auch die Begriffe des Messprozesses, der Zufall, etc. Es folgen einige Beispiele zur Beschreibung der Unbestimmtheitsrelation:

“Es ist danach also grundsätzlich unmöglich, die Bahn eines Elektrons im Atom zu beobachten, weil jede Ortsbeobachtung mit einem so nachhaltigen Eingriff in die Struktur des Atoms verbunden ist, daß dieses hierdurch wesentlich verändert wird.”[14, S. 769]

“Die Erkenntnis, dass es grundsätzlich unmöglich ist, gleichzeitig die beiden Größen Ort und Impuls bzw. Energie und Zeit eines Teilchens bzw. eines Wellenpakets genau zu bestimmen, [...] wird durch die Unschärferelation beschrieben.[...] Die Unschärfe kommt also nicht durch messtechnische Unzulänglichkeiten zustande, sondern ist grundsätzlicher Natur.”[12, S. 397]

Es ist deutlich die Verschiebung im Tenor sichtbar, auch wenn selbst die Formulierung im neuesten Schulbuch noch nicht alle Ansprüche an Klarheit erfüllt. Sie bleibt ein wenig schwammig: Was genau bedeutet eigentlich “grundsätzlicher Natur”?

3.2 Aktuelle Lehrpläne und Schulbücher

Der Schulunterricht wird maßgeblich durch die Lehrpläne bestimmt. Eine weitere wichtige Quelle sind die Lehrbücher der Schule. Diese spiegeln zum einen die Lehrpläne und zum anderen in unterschiedlichem Maße neuere fachdidaktische Diskussionen und Erkenntnisse. Um ein zutreffendes Bild dieser zentralen Medien zu erhalten, wurden Schulbücher und Lehrpläne erschienen ab dem Jahr 2000 auf ihre Schwerpunkte in der Vermittlung der Kernbegriffe der Quantenphysik hin untersucht. In den aktuellen Lehrplänen der 16 Bundesländer zeigt sich folgendes Bild, (Zugang über [3]).

Es werden im Vorspann in der Regel allgemeine Grundsätze formuliert, die beispielsweise eine Kompetenzorientierung im Unterricht fördern: Dazu gehören vor allem

- Auswertung und Interpretation von Experimenten
- Einblick in das Wechselspiel zwischen Modellvorstellung, Experiment und Theorie
- Überlegungen erkenntnistheoretischer Natur
- verschiedene philosophische Grundpositionen erkennen
- selbstständiges Literaturstudium

Vor allem ist hervorzuheben, dass von den Schülern und damit auch den Lehrern eine Reflektion über die Bedeutung der Quantentheorie für das physikalische Weltbild erwartet wird. Dabei passen Lehrpläne und Schulbücher - wie erwartet werden kann - recht gut zusammen.

Im nächsten Schritt wurden die Lehrpläne auf die Nennung von zu vermittelnden Begriffen und Inhalten analysiert. Bei der Übersicht in Tabellen 1 und 2] ist zu berücksichtigen, dass die Regelungsdichte sehr unterschiedlich ist. Manchmal ist ein Experiment oder ein Effekt nicht explizit erwähnt, obwohl aus genauerer Lektüre von Erwartungshorizont und Prüfungsaufgaben hervorgeht, dass die Behandlung im Unterricht erwartet wird.

Unbestimmtheitsrelation	14
Photoeffekt	14
Elektronenbeugung	13
DeBroglie	12
Interferenz/ Doppelspalt	12
Linienspektren	11

Qm-Atommodell	9
Wahrscheinlichkeitsaussagen	9

Tab1.: In Lehrplänen zur Quantentheorie oft vorkommende Begriffe

Man sieht im Ganzen eine gewisse Verschiebung hin zu den aktuellen Begriffen, wie das Taylor-Experiment oder die Nichtlokalität. Die Nennungen deuten bereits eine deutliche Aktualisierung an.

Messprozess	8
Welle-Teilchen	7
Taylor-Experiment	7
Komplementarität	6
Nichtlokalität	5
Interpretation	5
Schrödingergleichung	2
Spin	1

Tab2.: Weitere, in Lehrplänen zur Quantentheorie vorkommende Begriffe

Der Welle-Teilchen-Dualismus tritt in den Hintergrund; statt dessen wird von Quantenobjekten gesprochen; es werden auch Begriffe wie EPR oder Verschränkung behandelt und der Messprozess sowie Fragen der Interpretation diskutiert.

3.3 Lehramtsstudierende und ihr Blick auf Quantenphysik

Neben dieser materialen Grundlage des regulären Unterrichts stehen die Vorerfahrungen und Grundüberzeugungen der Lehrer. Es wurden 34 Lehramtsstudierende der Physik in Sachsen aus verschiedenen Semestern zu ihren eigenen Vorstellungen und Zielen im Unterricht über Quantenphysik befragt.

3.3.1 Emotionale Komponente

Die Erinnerungen an die eigene Schulzeit bedeuten auch eine emotionale Komponente. Lehramtsstudierende verbinden unterschiedliche Vorstellungen mit den Zielen und Inhalten der Quantenphysik als Unterrichtsthema. Dies umfasst eine große Spannweite:

“Einblick in Quantenwelt”

“Die Quantenphysik ist ein relativ schwieriges Thema, erst recht für Schüler, die nicht unbedingt Interesse an der Physik zeigen. dennoch ist es gut, (wenn man) von all dem schon mal was gehört hat.”

“Im Grundkurs Physik kann das Thema weggelassen werden, da es die Schüler ohnehin nicht interessiert.”

“Interessanter Einstieg und Experimente müssen gefunden werden. Schülereigeninitiative nutzen (Applets, Referate) Lehrer müssten im Team

arbeiten (zur Erleichterung) Quantenphysik kann sehr abstrakt sein.”

“Viel Spaß ! :)”

“Zumindest die Idee gehört auf jeden Fall in den Lehrplan, da sie längst zur festen Vorstellung der Welt um uns gehört.”

“Es ist schon wichtig, dass dieses Thema in der Schule behandelt wird, um einen Einblick zu bekommen. Jedoch ist es sehr komplex und auch etwas schwer verständlich, weil man Lichtquanten nicht auf den ersten Blick sieht.”

“Ein Thema, welches man auch aus dem Lehrplan streichen könnte, da es für Physikinteressierte nur schwer fassbar ist. Außerdem könnten solche Schülerinnen und Schüler noch mehr Abneigung gegen Physik entwickeln.”

Die Spannweite der Äußerungen reicht von der Überzeugung, dass die Quantenphysik integraler Bestandteil des Physikunterrichts sein sollte bis hin zur Auffassung, dass ihre Behandlung das Interesse an der Physik vollends zerstören könne. Besonders die kritischere Einstellung mancher Lehramtsstudierender zeigt, dass die Vermittlung der Quantenphysik auch an der Universität solche Bedenken aufnehmen und am besten auch entkräften sollte.

3.3.2 Kognitive Komponente

Neben der affektiven Komponente bestimmen die selber in der Schule erfahrenen Inhalte, die kognitive Komponente, entscheidend die Beurteilung, welche Inhalte in der Schule vermittelbar sind. Hierzu wurden 26 Studierende des Lehramts Physik im 4. Semester befragt. Diese hatten in ihrem Studium bereits eine Vorlesung über experimentelle Quantenphysik, jedoch noch keine Quantentheorie gehört. Sie sollten die Inhalte nennen, an die sie sich aus ihrem Schulunterricht erinnern konnten. Im Schnitt nannte jeder Student 2,9 Begriffe. Die häufigsten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Photoeffekt	16
Comptoneffekt	6
Welle-Teilchen-Dualismus	8
Energie-/Lichtquanten	8
$E=h \cdot f$ / Einsteingerade	6
DeBroglie/ Materiewelle	6
Wirkungsquantum	3
Unschärferelation	8
Doppelspalt	4
Laser	3
Anderes	7

Tab.3: Von den Studierenden genannten Inhalte des selber erfahrenen Unterrichts zu Quantenphysik

3.3.3 Vorstellungen über künftige Unterrichtsschwerpunkte

Auch die eigenen Vorstellungen bleiben über die Studienzeit verblüffend stabil und spiegeln die bereits vorher bekannten Schwerpunkte. allerdings kommen mit zunehmendem Wissen und Erfahrung neue Begriffe hinzu. In der folgenden Befragung von 34 Studierenden des 4. und 8. Semesters (also vor und nach Hören der Vorlesung in Quantentheorie) ist zu bedenken, dass die Studierenden durchaus unterschiedliche Vorlesungen und Übungen besucht haben. Dennoch zeigt sich, dass es anscheinend einen stabilen Kern an zu vermittelnden Inhalten gibt, der auch bei Studierenden nahe am Ende ihrer Ausbildung noch stark mit den selber im Physikunterricht erfahrenen Inhalten korreliert ist (Tab.4).

Photoeffekt	33
Comptoneffekt	29
Welle-Teilchen-Dualismus	34
Unschärferelation	33
Doppelspalt	30
Laser	33

Tab. 4: Inhalte, die Studierende als wesentlich für ihren zukünftigen Unterricht in Quantenphysik genannt haben. es antworteten 34 Studierende.

4 Universitäre Quantentheorie für Lehramtsstudierende

Die Vorlesungen über theoretische Physik, die in vielen Lehramtsstudiengängen für Physik an Gymnasien verpflichtend sind, liegen in aller Regel weit jenseits dessen, was die künftigen Lehrer in der Schule den Schülern vorstellen. Dennoch gibt es gute Gründe, sich mit ihr zu befassen: Die Lehrer müssen in der Lage sein, verbale Formulierungen auf ihre Stichhaltigkeit im Lichte von Experimenten und der mathematischen Formulierung zu überprüfen. Sie sollen die Physik auf einem fundamentalen Niveau verstehen, um den Schülern übergreifende Strukturen und Perspektiven der Erkenntnis zeigen zu können. Die Einheit der Physik und damit die Physik als Wissenschaft lässt sich mit der einheitlichen theoretischen Beschreibung besser verstehen als mit der Vielfalt der experimentellen Erscheinungen. Dies für die spätere Lehrtätigkeit fruchtbar zu machen, bedeutet aber besondere Anforderungen an Vorlesungen und Seminare für Lehramtsstudierenden. Gerade die Quantentheorie, die sich der Anschaulichkeit entzieht, benötigt in dieser Beziehung besondere Aufmerksamkeit.

Ein zentraler Punkt besteht darin, dass die Studierenden sowohl die Konzepte als auch die mathematischen Strukturen der Quantentheorie gut verstehen sollen. Im Zentrum der theoretischen Ausbildung

stehen aber formale Rechenfertigkeiten, die durch den erforderlichen Zeit- und Aufmerksamkeitsaufwand seitens der Studierenden die Entwicklung des eigentlich erwünschten Verständnisses verhindern können. Die mathematischen Strukturen müssen unter Beachtung des in Abschnitt 2.3 erläuterten Ebenenmodells interpretiert werden. Hier lässt die Quantenphysik in Abhängigkeit von Grundüberzeugungen verschiedene Möglichkeiten zu. Die Studierenden müssen daher sowohl die verschiedenen Sichtweisen kennen als auch wissen, welche Interpretationsansätze durch die mathematischen Strukturen gestützt werden oder nicht mehr möglich sind. Die Abgrenzung zur klassischen Physik spielt hierbei eine wesentliche Rolle. In der Schule wird darüber hinaus verlangt, dass sie sich argumentativ mit unterschiedlichen Ansichten auseinandersetzen können. Dazu sind ihnen didaktische Möglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Diese umfassen neben der Kenntnis einfacher, prägnanter Beispiele und Experimente die Konzentration auf Kernaussagen sowie die qualitative Formulierung auch komplexer mathematischer Zusammenhänge.

Diese vielfältigen Anforderungen können nicht in einer Theorievorlesung alleine abgedeckt werden. In eigens konzipierten (begleitenden) Übungen oder Seminaren muss das erforderliche begriffliche Niveau erreicht werden. Dabei sollten die formal-rechnerischen Anforderungen in den Hintergrund treten. Die Erfahrung zeigt, [21], dass sich bei den Studierenden weiterhin konzeptionelle Probleme zeigen, die dazu führen, dass die klassische Sichtweise erhalten bleibt oder sich eine Hybridsicht entwickelt. Vor allem bleibt das Verständnis des Messprozess klassisch bestimmt. Der Unterschied zwischen klassischem Zufall und dem quantentheoretischer Indeterminiertheit wird nicht gut verstanden. Der Welle-Teilchen-Dualismus bleibt in seiner Bedeutung, auch wegen der schwankenden Formulierungen in verschiedenen Quellen (s. Abschnitt 3.3), verschwommen. Es wird in der Beschreibung von Phänomenen implizit mit Bahnen argumentiert. Auch wird die Unbestimmtheit in der Regel als Streuung verstanden, was neben den Rechnungen auch mit den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ungenauigkeiten in der Unterscheidung der Argumentationsebenen zusammenhängt.

4.1 Lehrbücher

Die Studierenden lernen nicht nur aus Vorlesungen, sondern auch aus Lehrbüchern. Dabei treten öfters Probleme, auch im Sinne der zu Beginn genannten "Gewohnten Formulierungen" auf, wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben wurde. Allerdings sollte sich im universitären Studium die in den letzten Jahren gewonnene Klarheit in der Begrifflichkeit der Quantentheorie transportieren, die auch zu Verschiebungen in der Gewichtung von Begriffen führte.

Für eine Bestandsaufnahme unter den Lehrbüchern wurden acht nach dem Jahr 2000 aufgelegte Lehr-

bücher der Quantentheorie in ihren elementaren Teilen untersucht. Es wurden die dem entsprechenden Inhalt gewidmeten Seiten gemäß der Angaben im Inhaltsverzeichnis gezählt. Dabei wurden die kleinsten dort angegebenen Einheiten zugrundegelegt. Ferner wurden nur die der Quantenmechanik zuzurechnenden Inhalte berücksichtigt. Weiterführende Themen, wie eine Einführung in die Quantenfeldtheorie wurden nicht mitgezählt.

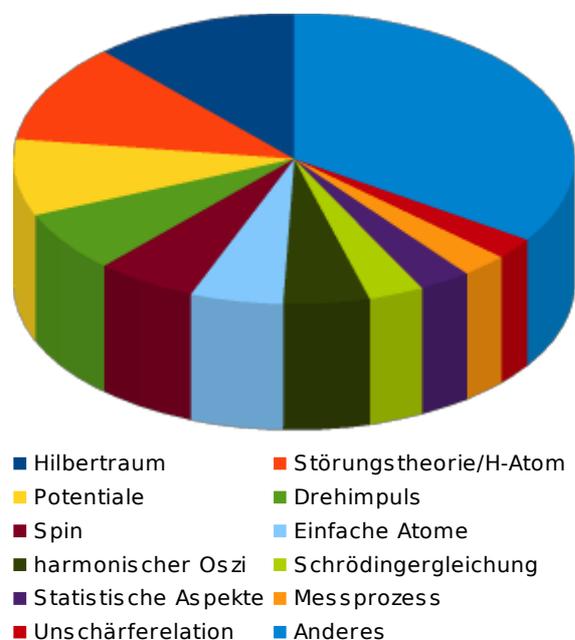


Abb. 1: Die Verteilung der Inhalte im Durchschnitt der acht untersuchten universitären Lehrbücher.

Die mathematischen und technischen Aspekte wie Hilbertraum und Schrödingergleichung, umfangreiche Rechnungen zu Atomen sowie die rechnerische Ableitung der Unschärferelation treten stark in den Vordergrund und nehmen bei weitem den größten Umfang in Lehrbüchern ein, (Abb. 1). Es liegt in der Natur der Sache, dass Themen mit einem hohen Rechenaufwand überproportional viele Seiten in Anspruch nehmen. Demgegenüber zeigt eine Analyse der Seiten, dass der reine Textumfang außerordentlich gering ist. Es wird wenig an Konzepten erklärt, auch nicht in Büchern, die speziell für Lehramtsstudierende verfasst sind. Ältere Bücher wie von Dirac [9] oder Landau&Lifschitz [16] enthalten noch in größerem Umfang Erklärungen. Instruktiv ist vor allem [16]: Die beiden ersten Abschnitte im ersten Kapitel “Die Grundbegriffe der Quantenmechanik” lauten “Das Unbestimmtheitsprinzip” und “Das Superpositionsprinzip”. Sie sind nahezu vollständig Erläuterungen ohne Formeln gewidmet. Die gewählten Überschriften lassen sich auch als Hinweis auf die Bedeutung dieser beiden Prinzipien für die Quantenphysik verstehen. Solche Schwerpunktsetzungen findet man in neueren

Büchern selten. Andererseits fällt auf, dass neuere Begriffe, die mittlerweile in etlichen Lehrplänen oder Schulbüchern verankert sind, wie Verschränkung, EPR-Experiment oder Nichtlokalität in den universitären Lehrbüchern nicht oder nur selten (in geringem Umfang) behandelt werden. Damit zeigt sich hier eine deutliche Diskrepanz zwischen dem, was die künftigen Lehrer brauchen und dem, was sie normalerweise lernen.

4.2 Vorlesungen

Zusätzlich wurden Anspruch und Wirkung einiger speziell für Lehramtsstudierende gehaltener Vorlesungen zur Quantentheorie analysiert.

4.2.1 Die Lehrenden

Dazu wurden fünf Lehrende in Leitfadeninterviews befragt, die Vorlesungen und Übungen in Quantenphysik und Quantentheorie für Lehramtsstudierende Physik am Gymnasium halten. Diese Befragung kann keinesfalls repräsentativ sein, gibt aber einen ersten explorativen Einblick in das Gefüge der Lehrens und Lernens. In den Zielen der Dozenten steht deutlich die Vermittlung grundlegender Konzepte und Arbeitsweisen im Vordergrund. Diese Ziele entsprechen grundsätzlich den Anforderungen der Lehramtsstudierenden und auch im wesentlichen den Intentionen der Lehrpläne.

Die Lehrenden fokussieren sich - auch wegen der Zeitbeschränkungen (2 SWS Theorievorlesung und 2 SWS dazugehörige Übungen) - auf Grundlagen. Dazu gehören die mathematisch-physikalischen Grundlagen, ein Verständnis der Grundstruktur und grundlegende Beispiele, Experimente und Anwendungen. Eher am Rande stehende Ziele sind zum einen die Vermittlung der Schönheit der Quantentheorie und das Lehren des Formalismus.

Den Lehrenden ist bewusst, dass die Lehramtsstudierenden einen eigenen Fokus benötigen. Als wichtigste Fähigkeiten neben der Kenntnis grundlegender Konzepte und wichtiger Beispiele wird dennoch vor allem die Fertigkeit benannt, formale Rechnungen durchführen zu können und Probleme mathematisch analysieren zu können.

Die genannten Ziele der Lehrenden wurden mit den für Vorlesung geplanten Inhalten abgeglichen. Ausgangspunkt hierbei ist die Vermittlung der Grundlagen, die sich in der Auswahl konkreter Beispiele äußert. Ein wesentliches Beispiel ist das Wasserstoffatom, welches explizit genannt wird. Geschichtliche Aspekte dienen zuweilen als Einstieg, spielen aber keine wesentliche Rolle. Auch das Eingehen auf Fragen der Interpretation wird genannt, steht aber nicht im Zentrum. Zentrale Begriffe sind Wahrscheinlichkeiten, der Messprozess, hier vor allem der Zugang über Dekohärenz, und Operatoren resp. Observable. Mathematische Strukturen wie Hilbertraum und Schrödingergleichung werden behandelt; Spin, Zustand und Ununterscheidbarkeit

werden eingeführt. Ein Teil dieser Konzepte und Inhalte findet sich auch in den Lehrplänen wieder. Es fehlen - zumindest in den genannten Konzepten - Photoeffekt, Elektronenbeugung, Debroglie-Wellenlänge, Welle-Teilchen Dualismus, Komplementarität und Nichtlokalität. Dies bedeutet nicht ohne weiteres, dass diese Themen nicht angesprochen werden, aber die Lehrenden haben diese anscheinend nicht im Fokus.

In der Erreichung dieser Ziele sehen sich die Lehrenden durch verschiedene Widrigkeiten behindert. Zum einen fehle die Zeit für die Vermittlung moderner Aspekte. Ferner seien die mathematischen Fähigkeiten der Studierenden zu schwach ausgeprägt.

4.2.2 Die Studierenden

Die Intentionen der Lehrenden wurden mit dem Blick der Studierenden abgeglichen: Was haben sie wahrgenommen? Dazu wurden 20 Studierende in einem online-Fragebogen befragt. Die am häufigsten von den Studierenden genannten Inhalte der Vorlesungen sind Potentiale, Schrödingergleichung, Drehimpuls, Hamiltonoperator, der Spin, teilweise auch der Dirac-Formalismus. Dabei unterscheiden die Studierenden zwischen den physikalischen und den mathematischen Aspekten (Modellen). Im ganzen kommen die Studierenden mit den Vorlesungen gut zurecht. Als Charakteristika nehmen sie wahr, dass der Schwerpunkt auf der Vermittlung von rechnerischen Fähigkeiten liegt, (19/20). In ihren Augen wurden die grundlegenden Konzepte während der Vorlesung klar (16/20). Etwas Verbesserungsbedarf wurde in der Erklärung des mathematischen Formalismus gesehen (12 von 20 hielten dieses für ausreichend). Ähnliches gilt für die Klärung von Verschränkung und Unbestimmtheit (11/20 zufrieden) oder Klärung des Messprozesses (8/20 zufrieden). Didaktische Aspekte wurden während der Vorlesung meist nicht behandelt, (18/20):

Jedoch gibt sich auch, dass Studierende mehr auf Details fokussiert sind, wie Comptoneffekt, Photoeffekt, Potentiale oder die Strahlungsformeln. Sie ordnen allgemeine Größen nur speziellen Beispielen zu: Spin hat mit H-Atom zu tun, aber nicht mit "Ununterscheidbarkeit"; sie erwähnen nicht den Messprozess oder die Unbestimmtheit. Dazu muss man bemerken, dass - auch wegen anstehender Klausuren - die Studierenden sich auf die Einzelheiten mehr konzentrieren. Die erwünschte Auseinandersetzung mit den Konzepten muss explizit thematisiert werden. Die Einordnung "von selber" benötigt zu lange Zeit. Auch fehlt in den Vorlesungen ein Teil der in schulischen Lehrplänen verlangten Inhalte.

Vor allem wünschen sich die Studierenden neben didaktischen Gesichtspunkten, (16/20), mehr praktische Hinweise zum Unterricht (18/20) oder sogar ein Konzept für eine Unterrichtseinheit (17/20) sowie Anwendungsbeispiele (14/20). Seltener legten

sie Wert auf Aspekte der Interpretation (8/20) oder eine zusätzliche Klärung und Vertiefung der mathematischen Grundlagen (7/20). Studierende wünschen sich als Ergänzung vor allem spezifische Hinweise zur Gestaltung des Unterrichts. Hier würden griffige Formulierungen und konkrete Beispiele weiterhelfen. Dieses wird in der Regel nicht in der Quantentheorie-Vorlesung behandelt werden können. Ein Begleitseminar oder eine entsprechende Übung, die Fach und Fachdidaktik verknüpft, wäre hierzu hilfreich.

5 Fazit

Die Analyse von schulischen Lehrplänen und der Lehre an der Universität zeigt gerade im Gebiet der Quantenphysik Lücken zwischen dem an der Universität Gelehrten und den in der Schule zu unterrichtenden Inhalten. Besonders deutlich wird die Diskrepanz zwischen Begriffen und Konzepten in Lehrplänen und in Vorlesungen bei dem Begriff der Verschränkung, den die Studierenden während ihres Studiums oft nicht kennenlernen. Eine weitere deutliche Diskrepanz zeigt sich in der erkenntnistheoretischen Einordnung, die in der Schule erwartet wird. Da die Quantenphysik besonders komplex in der Vermittlung ist, sollten diese Lücken rasch geschlossen werden. Besonders sind dabei die Weltbildaspekte zu berücksichtigen. Hierbei kann die klare Unterscheidung von epistemischer und ontischer Ebene eine gute Ausgangsbasis bieten. Es ist zu bedenken, dass sich Ungenauigkeiten in der Begriffsbildung erheblich auf das Verständnis auswirken können. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt ist, dass die künftigen Lehrer griffige Definitionen und Formulierungen brauchen, die ihren Unterricht strukturieren können und die sie ihren Schülern anbieten können. Die beispielsweise im Zusammenhang mit der Verschränkung oft angebotenen länglichen Erklärungen mit Hilfe von Experimenten oder Gedankenexperimenten, Messungen und Wahrscheinlichkeitsaussagen verhindern eher deren Behandlung im Unterricht. Dazu sind, gegebenenfalls in Begleitseminaren, die Ausgangsbasis und die Argumentationsebenen deutlich zu machen.

6 Literatur

- [1] Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1982). Experimental realization of einstein-podolsky-rosen-gedankenexperiment: A new violation of bells inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94.
- [2] Bell, J. S. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics*, 1, 195-197.
- [3] Bildungspläne / Lehrpläne der Bundesländer für allgemeinbildende Schulen: <http://www.bildungsserver.de/Bildungsplaene-Lehrplaene-der-Bundeslaender-fuer-allgemeinbildende-Schulen-400.html> (Stand 3/2012)
- [4] Bohr, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?

- Physical Review*, 48, 696–702. Auch in: K. Baumann, R. Sexpl (Hrsg.) (1987), *Die Deutungen der Quantentheorie*, Wiesbaden:vieweg.
- [5] Bouwmester, D., Pan, J.-W., Mattle, K., Eible, M., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1997). Experimental quantum teleportation. *Nature*, 390, 575–579.
- [6] Burkhard, U. (2009). *Quantenphysik in der Schule. Studien zum Physik- und Chemielernen*. Berlin:Logos-Verlag.
- [7] Clauser, J. S., Horne, M., Shimony, A., & Holt, R. (1969). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 23, 880–883.
- [8] Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society London, A400*, 97–117.
- [9] Dirac, P. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford: Oxford University Press.
- [10] Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 48, 696–702. Auch in: K. Baumann, R. Sexpl (Hrsg.) (1987), *Die Deutungen der Quantentheorie*, Wiesbaden:vieweg.
- [11] Gerlich, S. et al. (2011). Quantum interference of large organic molecules. *Nature Communications*, 2, 263.
- [12] Grehn, J. & Krause, J. (Hrsg.) (2011). *Metzler Physik*. Braunschweig:Schroedel, 4 edition.
- [13] Herzog, T. J., Kwiat, P. G., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1995). Complementarity and the quantum eraser. *Physical Review Letters*, 75(17), 3034–3037.
- [14] Höfling, O. (1968). *Lehrbuch der Physik*. Bonn: Ferd.Dümmlers Verlag.
- [15] Kwiat, P. G., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1997). Wechselwirkungsfreie Quantenmessung. *Spektrum der Wissenschaft*, 42–49.
- [16] Landau, L.D., Lifschitz, E.M. (1979). *Quantenmechanik*. Berlin:AkademieVerlag.
- [17] Lévy-Leblond, J.-M. (2003). On the nature of quantons. *Science & Education*, 12, 495–502.
- [18] Monroe, C., Meekhof, D., King, B., & Wineland, D. (1995). A Schrödinger Cat superposition state of an atom. *Science*, 272, 1131–1136.
- [19] Müller, R. et al. milq: *Quantenphysik in der Schule*. milq.tu-bs.de, (Stand 3/2012).
- [20] Müller, R. & Küblbeck, J. (2007). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*, Bd. 60 aus: Praxis Schriftenreihe, Physik. Köln:Aulis Verlag Deubner.
- [21] Müller, R. & Wiesner, H. (1997). Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zur Interpretation der Quantenmechanik - Ergebnisse einer Befragung. In Brechel, R. (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie - Probleme und Perspektiven*, (pp 382–384), Alsbach:Leuchtturm-Verlag.
- [22] Münster, G. (2010). *Quantentheorie*. Berlin: deGruyter.
- [23] Pan, J.-W., Bouwmeester, D., Daniell, M., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (2000). Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Nature*, 403, 515–519.
- [24] Primas, H.; Atmanspacher, H. (2003). Epistemic and Ontic Quantum realities. In: *Time, Quantum and Information*. (pp 301-321) Berlin:Springer.
- [25] Schilcher, K. (2010). *Theoretische Physik kompakt für das Lehramt*. München:Oldenbourg.
- [26] Schorn, B. & Wiesner, H. (2008). Die Quantenphysik in der Sekundarstufe. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 57(6), 26-34.
- [27] Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23, 807–812, 823–828, 844–849. Auch in: K. Baumann, R. Sexpl (Hrsg.) (1987), *Die Deutungen der Quantentheorie*, Wiesbaden:vieweg.
- [28] Zeilinger, A. (2000). Quantenexperimente zwischen Photon und Fulleren. *Physik in unserer Zeit*, 31(5); 199–202.