

## Auszug aus:

**Müller, Rainer: Quantenphysik in der Schule. Studien zum Physiklernen. Bd. 26. – Berlin: Logos 2003. Kapitel 1.3 und 1.4, S. 17 - 40.**

## Gliederung:

<b>I. Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten .....</b>	<b>S. 2</b>
<b>1. Frühe Untersuchungen in Bremen .....</b>	<b>S. 2</b>
<b>2. Die Untersuchungen von Wiesner .....</b>	<b>S. 6</b>
<b>3. Die Untersuchung von Lichtfeldt und Fischler .....</b>	<b>S. 13</b>
<b>4. Die Studie von Petri .....</b>	<b>S. 20</b>
<b>5. Studien im englischsprachigen Raum .....</b>	<b>S. 23</b>
<b>II. Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zur Quantenmechanik –     Ergebnisse einer empirischen Untersuchung.....</b>	<b>S. 26</b>

## I. Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

Moderne Ansätze zur Vermittlung der Quantenphysik sollten sich nicht nur an der Sachstruktur der Inhalte orientieren, sondern auch den Lernenden – die Schülerinnen und Schüler – als zentrales Objekt des Lernprozesses berücksichtigen. Infolgedessen wurden seit den achtziger Jahren verschiedene Forschungsprojekte über Schülervorstellungen zur Quantenmechanik durchgeführt. Es sollte erforscht werden, welches Vorverständnis die Schülerinnen und Schüler in den Unterricht mitbringen und welches die verbreitetsten Schwierigkeiten beim Aufbau eines adäquaten Verständnisses der Quantenphysik sind.

Verglichen mit den anderen Teilbereichen der Physik (wie z. B. Mechanik, Optik, Elektrizitätslehre), zu denen es buchstäblich Hunderte von Untersuchungen gegeben hat, ist die Forschung über Schülervorstellungen in der Quantenphysik noch nicht sehr umfangreich. Es ist deshalb an dieser Stelle möglich, auf die verschiedenen Untersuchungen einzeln einzugehen. Auf diese Weise lassen sich auch die Unterschiede in der Anlage und den Zielsetzungen der einzelnen Projekte berücksichtigen. Im folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen chronologisch in der Reihenfolge ihrer Veröffentlichung dargestellt.

### 1. Frühe Untersuchungen in Bremen

*Bayer* (1986) konzentriert sich auf die **Atomvorstellungen** der Schülerinnen und Schüler. Er setzt Fragebogen und Interviews ein, um Aufschluss über die Vorstellungen nach traditionellem Quantenphysik-Unterricht (Bohr'sches Atommodell plus Wellenmechanik) zu gewinnen. Die Untersuchung ist an der Gewinnung von qualitativen Erkenntnissen orientiert; quantitative Resultate sind nicht veröffentlicht.

Aus den Schüleräußerungen leitet Bayer die folgende Schlussfolgerung ab: "[Es] ist der Versuch erkennbar, die Bahn entweder zu halten oder wieder einzuführen. Der Begriff der 'Aufenthaltswahrscheinlichkeit' scheint mit dem Bahnbegriff für die Schüler sehr gut vereinbar zu sein, während der Begriff der 'stehenden Welle' in den Hintergrund tritt. Der Teilchenaspekt des Elektrons scheint wieder in den in den Vordergrund zu treten. Alte bewährte, von der Punktmechanik geprägte Denkmuster werden beibehalten oder wieder aufgegriffen. Nach bisheriger Durchsicht der vorliegenden Materialien scheint das für das Schülerverhalten allgemein typische an beiden Beispielen nicht etwa das konkrete Atombild zu sein, sondern die Lernstrategie, das Anpassen neuer Erkenntnisse, neuer Begrifflichkeiten an bereits Bekanntes. Passt etwas nicht so gut, tritt es in den Hintergrund" (Bayer 1986).

Bayer stellt die folgenden Hypothesen zu den Vorstellungen der Schüler auf:

- Das Denken der Schüler ist mechanistisch geprägt.

- Die Schüler bevorzugen ein Teilchenbild.
- Ein Planetenmodell ist deshalb so dominant, weil es in die mechanistische Denkweise der Schüler passt.
- Bezüglich der Schülervorstellungen ersetzt ein Planetenmodell des Atoms in der Atomphysik die Rolle der Alltagsvorstellungen in der Mechanik.

[...]

*Bormann* (1987) untersucht die Schülervorstellungen zu den **Welleneigenschaften von Elektronen**. Mit 24 Leistungskursschülern führt er Interviews vor und nach dem Unterricht zu diesem Thema durch. In den Interviews wurden die Schülerinnen und Schülern mit Ergebnissen (Elektronenbeugungsröhre, Taylor-Experiment) und Erklärungsansätzen konfrontiert, die die möglichen Erklärungen einengen sollten. Am Ende der Interviewsequenz ergaben sich die folgenden hauptsächlichen Kategorien von Schülervorstellungen.

- *Strikter Teilchenansatz* (N=8): Ein Elektron ist ein Teilchen mit Masse, Geschwindigkeit und hat eine geradlinige Bahnkurve. Die bei der Elektronenbeugung beobachtete Intensitätsverteilung ergibt sich durch Stöße.
- *Erklärungsansatz mit Bewegungswelle* (N=4): Das Elektron ist ein Teilchen mit Masse, Geschwindigkeit und hat zu jedem Zeitpunkt einen Ort. Die Welleneigenschaft spiegelt sich in der Art und Weise wider, wie sich das Elektron fortbewegt (Rotieren, Eiern oder sinusförmige Bahnkurve).
- *Kein Erklärungsansatz* (N=7): Eine nennenswerte Anzahl von Schülern konnte sich nicht zu einem Erklärungsansatz entschließen. "Bei 5 Schülern im Doppelspaltexperiment mit Elektronen war der kognitive Konflikt durch das Taylorexperiment offenbar so stark, dass sie keinen Erklärungsansatz entwickelten" (*Bormann* (1987)).

Die anderen von *Bormann* aufgestellten Kategorien fanden jeweils nur wenig Zustimmung. *Bormann* schließt: "Die meisten Schüler bleiben trotz der Experimente bei der Vorstellung vom Elektron als Teilchen. Die Teilchenvorstellung wird dabei nicht nur durch physikalische Eigenschaften (Masse, Geschwindigkeit, Bahnkurve), sondern besonders durch die meist kugelförmige Gestalt charakterisiert. Diese Gestalt wird beibehalten, während gewisse Ad-hoc-Annahmen (meist über die Bahnkurve) die Versuchssphänomene erklären sollen. [...] Beugung wird als Ablenkung aufgefasst, während Interferenz hauptsächlich mit Auslöschung und Verstärkung von Wellen assoziiert wird" (*Bormann* 1987).

*Bethge* (1988, 1992) führte eine umfangreiche Untersuchung zu grundlegenden Vorstellungen über Quantenphysik durch. Grundlage waren transkribierte Unterrichtsgespräche aus 10 Kursen, die teilweise nach dem Bremer Unterrichtskonzept

unterrichtet wurden. Dazu kamen Schülerinterviews (N=25). Bethges Ergebnisse werden im folgenden nach Inhaltsbereichen wiedergegeben:

- **Bahn und Bewegung**

Bei der Verwendung des Begriffs Bahn unterscheidet Bethge zwei Gruppen: "Für die erste Gruppe von Schülern dient der Begriff als Abgrenzung zwischen klassischer und quantenmechanischer Beschreibung von Phänomenen. In der zweiten Gruppe wird der Bahnbegriff direkt zur Beschreibung von quantenphysikalischen Phänomenen herangezogen" (Bethge 1992).

Zur Illustration der beiden Vorstellungsklassen gibt er die folgenden Schüleräußerungen an:

Also ich habe den gesamten Bahnbegriff ja eigentlich weggelegt in Sachen Atomphysik. Diese Funktion, die man da hat, ist lediglich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ein Elektron. Aber man kann nicht sagen, dass es sich auf einer Bahn bewegt. Es lässt sich eigentlich -- die Bewegung lässt sich überhaupt kaum irgendwie erklären. Eine Bahn ist das halt nicht mehr.

Das wird ja verrückt, das Ganze. Verdammt, dann könnte es sich theoretisch auch bewegen dazwischen. Nur dass es sich im seltsamen Zickzack bewegt, aber das wäre ja im Grunde genommen wieder irgendsowas wie eine Bahn. Und das ist ja auch wieder verrückt. Also da muss ich passen irgendwie.

Bethge schätzt den Anteil der Schülerinnen und Schüler, die sich auf eine solche Ablehnung des klassischen Bahnbegriffes einlassen auf ein Viertel. Die zweite Gruppe (explizites Festhalten am Bahnbegriff) wird durch folgende Äußerung illustriert:

Dass die Elektronen sich bewegen -- sonst wäre dieser ganze Kram mit dieser Wahrscheinlichkeitswelle ja wieder Blödsinn. Da es überall auftaucht, da muss es sich halt bewegen. Sonst wäre es ja alles ziemlich überflüssig, wenn es sich immer an einem Punkt aufhalten würde.

- **Stabilität der Atome**

In den Bereich der Atomvorstellungen gehört die Frage, warum Atome stabil sind. Hier meint Bethge, dass "die Schüler versuchen, Aktivitäten o. ä. der Elektronen zu benennen, die verhindern sollen, dass das Elektron in den Kern stürzt. Diese Vorstellung wird von der überwiegenden Anzahl der Schüler geäußert. Eine Abschätzung der Häufigkeit ist [..., dass] rund 90% der Schüler die Stabilität der Atome mit Fliehkräften bzw. der Kreisbewegung der Elektronen auf Bahnen begründen. Nur wenige Schüler erwähnen dabei überhaupt die Problematik der elektrodynamischen Stabilität im Sinne des 2. Bohrschen Postulats" (Bethge 1992).

Nach den Erfahrungen von Bethge, wählen im Bereich der Stabilität der Atome auch solche Schülerinnen und Schüler eine rein mechanische Beschreibungsweise (mit Bahnen), die zur Erklärung von Vorgängen im Bereich der

Atomhülle Wahrscheinlichkeitsvorstellungen heranziehen. Dazu gibt er das folgende Beispiel:

Karl: Ich hab mir die Stabilität immer so vorgestellt, dass die Coulombkraft und die Fliehkraft sich immer genau aufheben. ... Das passt natürlich überhaupt nicht zur Quantenmechanik.

I: Gibt es für euch einen Zusammenhang zwischen euren Vorstellungen von Wahrscheinlichkeiten, die wir eben diskutiert haben, und der Stabilität der Atome?

Karl: Nein, für mich gibt es keinen Zusammenhang. Für mich gibt es einerseits diese Vorstellung von der Stabilität und auf der anderen Seite die Sache mit der Wahrscheinlichkeit. Ich trenn diese beiden Sachen völlig. Für mich sind das zwei Paar Schuhe. ... Ich habe zwei ganz verschiedene Vorstellungen. Einmal für die Stabilität, da würde ich sagen, es bewegt sich auf einer Bahn. Und zum andern für die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten.

Bethge kommentiert diese Situation folgendermaßen: "Dieser Schüler macht eine scharfe Trennung zwischen seiner Vorstellung von Stabilität, die er über mechanische Stabilität im Rahmen des Bohrschen Modells erklärt, und der Wellenmechanik. Für Schüler ist die Formulierung ihrer Vorstellungen situationsgebunden, es wird keine einheitliche Vorstellung angestrebt. *Versucht man ein generelles Atombild zu skizzieren, so dominiert die Vorstellung von auf Bahnen um den Kern kreisenden Elektronen auch nach dem Unterricht über Quantenphysik*" (Bethge 1992, Hervorhebung: R. M.)

- **Wahrscheinlichkeit**

Beim Umgang der Schülerinnen und Schüler mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff kann Bethge drei Aspekte unterscheiden:

- *Wahrscheinlichkeit als Interpretations- oder übersetzungskalkül*

Der Begriff der Wahrscheinlichkeit wird instrumentell verwendet, um physikalische Fragestellungen bearbeiten zu können. Der Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeiten und relativen Häufigkeiten schaffte eine für die Schülerinnen und Schüler vorstellbare Situation.

- *Wahrscheinlichkeit als akausale Beschreibung*

Nach Bethge fordern einige Schüler "zum Verständnis von vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen [...] eine kausale Erklärung für die *Entstehung* dieser Verteilungen auf der Grundlage von Einzelereignissen ein" (Bethge 1992; Hervorhebung: R. M.). Das folgende Zitat illustriert die Problematik:

Olaf: ... Wieso weiß das Quant denn, dass es da nicht hin darf? – Die sind nämlich doch schlau, dass die sich umdrehen und wechseln, mal Welle, mal Teilchen.

Andreas: Bei den Elektronen haben wir doch Räume bestimmter Wahrscheinlichkeiten.

Olaf: Wenn die nicht mehr weiter wissen, dann kommen die mit irgendwelchen Wahrscheinlichkeiten. [...] Was für einen Grund haben die Quanten, sich so zu verteilen?

Andreas: Naturgesetz!

Olaf: Ich meine, wenn man jetzt ein Münze wirft, ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine von den beiden Seiten auftrifft, eben 1/2. Und diese Wahrscheinlichkeit tritt auf, weil beide

Seiten gleichberechtigt sind. – Also aus welchen Gründen sollen die Quanten sich denn so verteilen?

– *Wahrscheinlichkeit als Ungenauigkeit*

In dieser Kategorie verbinden einige Schüler mit dem Begriff Wahrscheinlichkeit die aus der Umgangssprache entnommene Vorstellung von Ungenauigkeit und Zufälligkeit. Wahrscheinlichkeitsaussagen haften der Charakter des Ungenauen und Uneindeutigen an.

Insgesamt beurteilt Bethge (1992) die Vorstellungen zum Wahrscheinlichkeitsbegriff folgendermaßen: "Die Interpretation der  $\Psi$ -Funktion über die Angabe von Wahrscheinlichkeiten wird von Schülern als *Kalkül* akzeptiert und verwendet. Eine grobe quantitative Abschätzung dieses Verbreitungsgrades dieses Vorverständnis-Elements ist [,dass] rund 4/5 der Befragten sinnvoll mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff als Interpretationskalkül umgegangen [sind]. Das Zustandekommen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bedarf allerdings für Schüler einer weiteren (kausalen) Erklärung, anderenfalls bleibt eine Unzufriedenheit mit dieser Art der Beschreibung zurück. Die von Schülern für notwendig gehaltene Begründung für eine Wahrscheinlichkeit wird im Unterricht von ihnen nur selten eingefordert; es steht für sie die (richtige) Anwendung des Kalküls im Vordergrund. Die fehlende Begründung steht im Zusammenhang mit der mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff verbundenen Vorstellung von "Ungenauigkeit". Die Unzufriedenheit mit der in den Augen von Schülern unzureichenden Beschreibungsmöglichkeiten quantenphysikalischer Phänomene wird in Gesprächen über den Unterricht zur Atomphysik deutlich. über die Vorstellung zur Entstehung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung wird von Schülern eine Verbindung zur Vorstellung von der Bewegung der Elektronen auf Bahnen hergestellt".

• **Energie**

Die Quantisierung der Energie bei gebundenen Systemen wird von den Schülerinnen und Schülern fraglos akzeptiert und auch in eigenständigen Erklärungsansätzen herangezogen.

## 2. Die Untersuchungen von Wiesner

Seit Mitte der achtziger Jahre wurden an der Universität Frankfurt von Jung, Wiesner, Engelhardt und anderen Untersuchungen zu Schülervorstellungen über Quantenmechanik durchgeführt (Göritz und Wiesner 1984, Jung und Wiesner 1985, Engelhardt und Wiesner 1986, 1988). Ausführliche Zusammenfassungen dieser Arbeiten findet man in Wiesner (1989) und Wiesner (1996).

In den mündlichen Befragungen wurden 27 Leistungskursschülerinnen und -schüler nach dem Unterricht über Quantenphysik untersucht. Mit ihnen wurden Interviews von jeweils etwa einer Stunde Dauer durchgeführt. Neben reinen Kenntnisfragen sollten die

Schülerinnen und Schüler auch zu den (in diesem Kontext relevanteren) begrifflichen Themen aus der Quantenphysik Stellung nehmen.

- **Wesentliche physikalische Größen klassischer Objekte**

Auf die Frage, welches die wesentlichen physikalischen Größen klassischer Objekte seien, wurden die Folgenden genannt (Wiesner 1996): (i) Masse, Gewicht (85%); (ii) Größe, Volumen, Gestalt, Form (43%), (iii) Geschwindigkeit, Bewegung (38%); (iv) Impuls (27%); (v) Ort (15%); (vi) Dichte (15%); (vii) Energie (12%).

Nach Wiesner erstaunt an dieser Rangfolge der genannten Größen, dass die Masse von fast allen Schülern angegeben wird, der Ort dagegen recht selten. Er gibt explizite Beispiele dafür, dass der Ort von den Schülerinnen und Schüler als nicht wichtig angesehen wird (Wiesner 1989):

I: Welches sind die interessantesten, wichtigsten Größen für ein solches klassisches Objekt?

S2: Ja, die Masse, die Zeit, die Dimension, also die Größe –

I: Sonst noch irgend etwas?

S2: Nee, glaub' nicht.

I: Der Ort, ist der für Sie nicht besonders wichtig?

S2: Nein, für den Körper selbst nicht.

I: Und für wen?

S2: Ja das – der Ort spielt ja nur eine Rolle, welchen Einfluss der Ort auf den Körper ausübt, nicht die Entfernung vom Ort.

- **Wesentliche physikalische Größen von Quantenobjekten**

Gegenüber der gleichen Frage für klassische Objekte verschiebt sich das Antwortspektrum deutlich. Genannt wurden: (i) Masse (37%); (ii) Ladung (37%); (iii) Geschwindigkeit, Impuls (37%); (iv) Energie (26%); (v) Spin (22%); (vi) Energiestufen/-quanten (15%); (vii) Ort nicht genau bestimmbar bzw. festgelegt (11%); (viii) keine absolute Masse (11%); (ix) de-Broglie-Wellenlänge (7%).

Für die Quantenobjekte wird die Masse nicht mehr in gleichem Maße als wichtig angesehen wie für klassische Objekte. Die Ladung kommt nun als wichtiges Merkmal hinzu, und auch die Energie spielt nicht mehr die untergeordnete Rolle wie vorher. Interessant ist die Kategorie (vii), für die Wiesner (1996) die beiden folgenden Interviewauszüge angibt:

I: Wir messen den Ort ...

S10: Kann man nicht!

I: Dann wäre es unmöglich, den Elektronen einen Ort zuzuordnen.

S10: Man kann nur Wahrscheinlichkeiten zuordnen.

I: Wie ist es mit der Geschwindigkeit?

S10: Die ist immer bestimmt. Sonst könnten die in einer Kernforschungsanlage nicht auf bestimmte Geschwindigkeit gebracht werden.

I: Ja, ja. Wie ist es denn eigentlich mit dem Ort, egal ob beim quantenmechanischen oder beim klassischen Teilchen. Ist das für Sie eine Eigenschaft?



S9: Der Ort? Ja, bei 'nem – der Ort ist insofern eine Eigenschaft, als das bei einem klassischen Teilchen der Ort eben genau festgestellt werden kann, also dass davon ja die klassische Physik ausgeht und auch darauf aufbaut, also die gesamte Mechanik.

I: Ja, ja.

S9: Und bei einem Quantenobjekt ist es nun eben so, dass der Ort nicht mehr beliebig genau bestimmt werden kann, dass insofern man auch nicht mehr von einer bestimmten Eigenschaft des Ortes reden kann, sondern eben nur von einer Wahrscheinlichkeit des Teilchens, sich an einem bestimmten Ort aufzuhalten. Das Teilchen hat also nur Wahrscheinlichkeiten für den Ort, also eben stochastisches Verhalten der Teilchen. Wenn ich viele hab', die sollen an einem Ort sein oder auch eine bestimmte Geschwindigkeit haben, dann kann es eben sein, dass das variiert.

I: Ja, ja. Kann es denn auch mal einen ganz bestimmten Ort haben? Oder ist es immer so unbestimmt?

S9: Ich kann –

I: Sagen wir einmal: ein Elektron, um etwas Konkretes vor Augen zu haben.

S9: Ja gut, ja. Nein, ein Elektron kann nie einen bestimmten Ort haben. Auch, oder, naja, wenn die Geschwindigkeit null ist, auch dann hat es keinen bestimmten Ort. Es kann ja auch die Geschwindigkeit nie null werden.

Wiesner (1996) kommentiert: "Mehrere Schüler hatten diese Vorstellung, dass Quantenobjekte immer in Bewegung seien und deshalb keine Ortseigenschaft haben". Auf die Frage nach der permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten wird weiter unten noch ausführlicher eingegangen.

- **Unterschied zwischen klassischen und Quantenobjekten**

Auf die Frage nach dem wesentlichen Unterschied zwischen einem klassischen und einem Quantenobjekt sieht "die verbreitetste Aussage [...] die klassische Physik als Grenzfall der Quantenphysik an, der Übergang ist kontinuierlich in dem Sinne, dass sich mit kleiner werdenden Objekten die Quanteneigenschaften immer deutlicher zeigen" (Wiesner 1996). 30% der Schülerinnen und Schüler äußerten sich im Sinne eines solchen kontinuierlichen Übergangs.

Für 26% der Schülerinnen und Schüler liegt der wesentliche Unterschied im Dualismus bzw. der Notwendigkeit von Modellbeschreibungen. Hierzu ein Interviewauszug:

S8: Der wichtigste Unterschied liegt für mich eigentlich darin, dass ich klassische Objekte immer nach Masse und Ort beschreiben kann und Quantenobjekten aber nicht immer einen festen Ort zuschreiben kann. Daraus folgt dann eigentlich auch, dass ich Quantenobjekte im Grunde immer nur mit einem Modell beschreiben kann, mit einem Denkmodell, das ich mir überlege und das aber dann irgendwo auf Grenzen stößt und ich muss mir etwas Neues dazu überlegen oder ich muss mein altes Modell ändern. Ich kann also nicht wie bei der klassischen Physik sagen, das ist jetzt so und nicht anders und es wird mir auch überall bestätigt, bei allen Versuchen, sondern wenn ich in neue Situationen komme, dann muss ich oft auch mein Denkmodell oder meine Vorstellung von diesem Quantenobjekt ändern. Das ist also nichts Greifbares und auch nichts unbedingt, was ich absolut beschreiben kann.

Die Quantisierung, insbesondere die Energiequantisierung wird von 19% der Schülerinnen und Schüler als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal genannt. Eine interessante Vorstellung wird von 15% geäußert: "[...] dass Quantenobjekte (wegen ihrer Kleinheit) im Gegensatz zu den Makroobjekten problemlos eine



sehr große Geschwindigkeit besitzen können. Ebenfalls im Gegensatz zu klassischen Objekten befinden sich Quantenobjekte in ständiger Bewegung" (Wiesner 1996). Ebenfalls 15% weisen auf Effekte (z. B. Compton-Effekt) hin, die nur im Bereich der Quantenmechanik auftreten können. Interessant ist, dass die Unbestimmtheitsrelation mit 4% kaum zu den wichtigen Unterschieden zwischen klassischen und Quantenobjekten gerechnet wird.

Mit 11% häufiger wird genannt, dass Quantenobjekte keine Ortseigenschaft besitzen: "Letztes Jahr haben wir von der Unschärferelation gehört. Dass man z. B. nicht Ort und Impuls gleichzeitig genau bestimmen kann. Von daher kann man ja auch ein Elektron nicht so bestimmen wie eine große Kugel.

- **Vorstellungen vom Photon**

Wiesner (1996) fasst die Vorstellungen zum Photon folgendermaßen zusammen: "1/3 der befragten Schüler beschreiben Photonen als Lichtteilchen, die sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften haben. 1/6 der Schüler unterlag einem Missverständnis: Das Symbol für das  $\gamma$ -Quant in der Darstellung des Compton-Effekts wird als Bahn des Quantenobjektes gedeutet [...]". Daneben finden 25% der Schülerinnen und Schüler bemerkenswert, dass Photonen masselos sind (vgl. die Aussage "haben nur eine Masse, wenn sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen"). Schließlich wird noch die Vorstellung vom Photon als Energiequant geäußert (1/6 der Schülerinnen und Schüler) sowie darauf hingewiesen, dass ein Photon bei Übergängen in Atomen abgestrahlt wird (8%).

- **Gründe für die Einführung der de-Broglie-Wellenlänge**

Bei dieser Frage sollten die Schülerinnen und Schüler Argumente für die Einführung der de-Broglie-Wellenlänge liefern. Es ergaben sich die folgenden Antwortkategorien: (i) Beugungs-/Interferenzversuche mit Beispiel (22%); (ii) Verweis auf Interferenz ohne Angabe eines Experiments (22%); keine Argumente (15%); (iv) Materiewellen/stehende Wellen (15%); (v) Begründung durch Formeln (11%; "Das ergibt sich aus der de-Broglie-Formel"); (vi) Compton-Effekt (11%); (vii) Quantenobjekte führen eine wellenförmige Bewegung aus (4%); (viii) Wellenpaket zur Teilchenbeschreibung (4%); (ix) Atomspektren (4%).

- **Permanente Lokalisierung bei Quantenobjekten**

In der klassischen Mechanik besitzen wie im Alltag Objekte zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort. Nach der üblichen Interpretation ist das in der Quantenmechanik nicht mehr so. Es stellt sich die Frage, ob nach dem Quantenphysik-Unterricht bei den Schülerinnen und Schülern die Vorstellung einer permanenten Lokalisierung noch präsent ist oder ob sie zugunsten quantenmechanischer Vorstellungen ausgeräumt werden konnte.

Wiesner (1996) stellt dazu fest: "Die Mehrzahl der Schüler äußert spontan indifferente Bedenken gegen die Lokalisierung, gehen aber sehr leicht davon ab und stimmt der permanenten Lokalisierung zu. [...] Das hier beschriebene

Endverhalten erscheint in dem Sinn "negativ", was vielen Schülern zwar bewusst ist, dass bei Elektronen einiges anders ist, sie haben aber keine klaren, stabilen Vorstellungen darüber, was anders ist".

Wiesner findet die folgenden Antwortkategorien:

*(i) Quantenobjekte sind permanent lokalisiert*

Die Vorstellung, dass Quantenobjekten zu jeder Zeit ein bestimmter Ort zukommt, lässt sich in die folgenden Unterkategorien von Vorstellungen aufgliedern:

*(ia) Objektpermanenz (24%)*

Diese Vorstellung lässt sich durch die Aussage "irgendwo muss es ja sein" charakterisieren. Ein Beispiel ist der folgende Interviewauszug aus Wiesner (1996):

I: Wie ist es, wenn man jetzt hier Mikroobjekte herumschwirren lässt: Darf ich mir dann immer noch vorstellen, dass die Elektronen zu einem bestimmten Zeitpunkt jeweils an einem bestimmten Ort sind, den ich zwar nicht kenne.

S2: Die Elektronen bewegen sich mit großer Geschwindigkeit.

I: Ja, ich meine zu einem bestimmten Zeitpunkt.

S2: Da sie ja – sie unterscheiden sich ja von der Umgebung. Man kann sie ja identifizieren, an irgendetwas. Und da können sie ja eine noch so große Geschwindigkeit haben, zu einem bestimmten Zeitpunkt müssen sie ja irgendwo sein!

*(ib) Praktische Schwierigkeiten bei der Ortsbestimmung (16%)*

Die Schülerinnen und Schüler in dieser Kategorie sind der Auffassung, dass Quantenobjekte permanent lokalisiert sind, durch die Messschwierigkeiten bei der Ortsbestimmung (bzw. die schnelle Bewegung) ist es schwierig, den Ort festzustellen ("Die bewegen sich – schnell, und da ist sicherlich schwierig festzustellen, wo die ...").

*(ic) Ortsangabe möglich, wenn auf die Impulsangabe verzichtet wird (12%)*

Die Schülerinnen und Schüler in dieser Unterkategorie beziehen sich auf die Unbestimmtheitsrelation und gestehen den Elektronen einen Ort zu, wenn man auf eine Impulsangabe verzichtet ("Nur nach den Orten? Wenn Sie völlig darauf verzichten, die Geschwindigkeit anzugeben. Theoretisch müssten Sie ihn dann berechnen können. Das geht dann allerdings gegen Unendlich").

*(id) Stetigkeit der Bewegung (4%)*

In dieser Unterkategorie wird mit der Stetigkeit der Bewegung argumentiert. Ein Beispiel: "Also ich würde sagen, die Bahn ist kontinuierlich, wenn Sie so sagen wollen. Nicht dass es dahin springt". Wiesner (1996) kommentiert: "Dieser Schüler äußerte zunächst die Ansicht, dass für das Quantenobjekt keine Bahn angegeben werden kann, nur Raumgebiete, in denen es sich befindet. Er gab diesen Standpunkt aber sehr spontan auf, wie obige Äußerung zeigt".

(ii) *Quantenobjekten kann keine (permanente) Ortseigenschaft zugeschrieben werden*

Auch hier lassen sich Unterkategorien angeben:

(iia) *Indifferente Bedenken (12%)*

(iib) *Ort kann wegen Störung des Zustandes nicht gemessen werden (12%)*

Ein Beispiel dazu ist die folgende Aussage (Wiesner 1996):

Ja, allerdings durch die Messung ist bei so kleinen Teilchen eine Verfälschung da. Wenn ich z. B. einen Apfel messe, wo er ist, dann ist ja die Einwirkung, eine bestimmte Gegenreaktion. Wenn ich was messe, messe ich eigentlich die Gegenreaktion. – Und wenn ich bei so kleinen Teilchen davon ausgehe, kann ich ja den Ort nicht – wenn ich meinetwegen mit Elektronen messe, ist ja die kleinste Einheit, die wir haben. Dann wär es ja praktisch ein Impuls mit zwei Massen, und dann, dann geht das nicht.

(iic) *Verweis auf die Unbestimmtheitsrelation (8%)*

Als Beispiel für diese Unterkategorie gibt Wiesner das folgende Beispiel für eine missverstandene Variante der Unbestimmtheitsrelation: "Geht nicht, kann gar nicht feststellen, ob an einer Stelle. Gibt da immer so eine Unschärfe. Man kann nicht zu einem festen Zeitpunkt gleichzeitig den Ort feststellen".

(iid) *Dualismus (8%)*

Weil das Elektron für die Schülerinnen und Schüler gleichzeitig auch eine nicht genau lokalisierbare Welle ist, kann der Ort nicht genau angegeben werden.

(iie) *Quantenobjekte habe keine scharfe räumliche Abgrenzung (4%)*

(iif) *Elektron kann verschwinden ("zerstrahlen") (4%)*

- **Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation**

Dass zur Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation eine Vielzahl von teilweise falschen Vorstellungen existiert, zeigen die Antworten auf die Frage nach der Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation. Die folgenden Antwortkategorien ergaben sich:

(i) *Ort und Impuls sind bei Quantenobjekten nicht gleichzeitig genau messbar/ bestimmbar (43%)*

Diese "typische Schulbuchformulierung" war die häufigste der geäußerten Antworten.

(ii) *Gegenläufiges Verhalten in den Genauigkeiten von  $x$  und  $p$  (13%)*

Diese Kategorie wird charakterisiert durch die Aussage: "Je genauer die Ortsmessung, desto ungenauer die Impulsmessung und umgekehrt".

(iii)  *$x$  und  $p$  sind einem Quantenobjekt nicht gleichzeitig beliebig genau zuzuschreiben (13%)*

Wiesner (1996) schreibt zu dieser Kategorie: "Ob die Schüler mit diesen Formulierungen die sehr weitgehende Auffassung vertraten, dass den Quanten-

objekten eine gleichzeitige Orts- und Impulseigenschaft prinzipiell nicht zukommt, wurde nicht deutlich genug geklärt". Er gibt den folgenden Interviewauszug wieder, der in diese Richtung weist:

S12: Wenn ich einmal den Ort genau betrachte, kann ich den Impuls nicht genau bestimmen und umgekehrt. ... Ich würde nicht nur so weit gehen, das so zu interpretieren, dass man durch die Messanordnung es nur praktisch verändert, sondern dass es eine physikalische Eigenschaft unserer Welt ist, also eine grundlegende Eigenschaft unserer Welt. Ob man misst oder nicht, diese Unschärfe ist vorhanden. Ich würde es also als eine physikalische Eigenschaft unserer Welt interpretieren.

*(iv) Ort und Zeit nicht beliebig genau messbar (13%)*

Hier wird die Unbestimmtheitsrelation auf ein falsches Paar von physikalischen Größen bezogen. Einige Schülerinnen und Schüler verallgemeinern die Unbestimmtheitsrelation sogar auf beliebige Paare von Größen.

Während der Interviews konnten sich 11% der befragten Schülerinnen und Schüler nicht mehr an die Aussage der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation erinnern. Sonstige Auffassungen über die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation vertraten 13%.

- **Bedeutung von  $\Delta x$  und  $\Delta p$**

Im Zusammenhang mit der Frage nach der Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation steht die nach der Bedeutung von  $\Delta x$  und  $\Delta p$ . Nach Wiesner (1996) bereitete diese Frage den meisten Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten. "Nur wenige waren in der Lage, spontan eine einigermaßen klare Antwort zu geben ("... kann ich jetzt nur raten. Ich weiß es jetzt nicht genau, das  $\Delta x$  ..."). Deutlich dominierend waren Antworten mit dem Vorstellungshintergrund, dass der "richtige" Wert – obwohl existierend – aus verschiedenen Gründen nicht festzustellen ist" (Wiesner 1996).

Folgende Antwortkategorien ergaben sich:

*(i) (Orts-)Änderung, Wegzuwachs (17%)*

*(ii) Abstand des gemessenen Wertes vom eigentlichen, wahren Wert (13%)*

Als Beispiel für diese Kategorie kann die folgende Aussage gelten: "Die Abweichung, wo das Teilchen wirklich war und wo es gemessen wurde".

*(iii) Differenz zweier Ortswerte (Messwerte) (13%)*

Hier ist  $\Delta x$  die Differenz zweier Orte, die zu verschiedenen Zeiten gemessen wurden. "Das Teilchen hat ja immer einen Anfangsort und danach einen zweiten Ort, den Endort".

*(iv) Deutung als kleine Werte*

In der Physik stehen " $\Delta$ -Größen" oftmals für kleine Werte: " $\Delta x$  ist – irgendwie klein."

*(v) Eingeschränkte Definitionsmöglichkeit (4%)*

Nach Wiesner (1996) finden sich Andeutungen der Bohr'schen Auffassung nur bei einem einzelnen Schüler: "Das sind – das ist so ein Bereich, in dem das ver-schwimmt. Das  $\Delta x$  ist letztlich die Unschärfe des Ortes letztlich".

*(vi) Fehlergrenzen (als Maß für die Messungenauigkeit) (8%)*

*(vii) Zulässiger Aufenthaltsbereich (8%)*

Als Beispiel für diese Kategorie sei der folgende Interviewauszug wiedergegeben:

I: Können Sie das  $\Delta x$  etwas näher beschreiben? Also was Sie sich drunter vorstellen.

S26: Also halt – ein bestimmtes, nein, nicht bestimmtes Intervall, wo es sein könnte. Der Bereich, wo es sich aufhalten kann.

I: Der Bereich –

S26: – in dem es sich aufhalten kann.

I: Und beim Impuls?

S26: Da stell ich mir immer so eine Art Mittelwert vor, den man da angeben kann, weil man nicht sagen kann etwas größer oder etwas kleiner.

I: Mittelwert, das ist doch ein genau angegebener Wert. Dann wäre das, das  $\Delta p$ , auch völlig ver-schieden von dem  $\Delta x$ .

S26: Ja, ich meine, der Impuls hängt mit dem Ort eng zusammen, wo er gerade ist, hat er einen anderen Impuls.

I: Denken Sie an so eine klassische Bahnkurve?

S26: Ist praktisch auch so eine Art Bereich, in dem es liegen könnte.

*(viii) Unkenntnis über den Ort vor der Messung (4%)*

Durch die Ortsmessung wird das Quantenobjekt gestört; es befindet sich an-schließend nicht mehr an dem vorherigen Ort.

Nach der statistischen Interpretation der Quantenmechanik sind  $\Delta x$  und  $\Delta p$  als Standardabweichungen statistischer Verteilungen von Messwerten aufzufassen. Wiesner (1996) bemerkt dazu: "Kein Schüler, auch nicht die in (vi) ein-geordneten, interpretiert  $\Delta x$  bzw.  $\Delta p$  als Standardabweichungen. Diese begrifflich recht einfache Festlegung wurde demnach in keinem Kurs verwendet.

### 3. Die Untersuchung von Lichtfeldt und Fischler

Eine umfangreiche Untersuchung zu Schülervorstellungen über Quantenphysik wurde von Fischler und Lichtfeldt (1992a–c) im Zusammenhang mit der Evaluation des Berliner Unterrichtskonzepts durchgeführt. Über die Ergebnisse der Evaluation wird in Abschnitt 2.2 von [Müller: Quantenphysik] berichtet, bzw. im *milq-Internet-Portal*, Menüpunkt *Die Spezialgebiete*, Unterpunkt *Didaktische Konzepte, 2. Das Berliner Konzept*. Im jetzigen Zusammenhang interessieren die allgemeinen Ergebnisse über Schülervorstellungen, die nachfolgend referiert werden sollen. Lichtfeldt (1992a) untersucht die Schülervorstellungen *vor* und *nach* dem Unterricht separat.

Die Erhebungsinstrumente umfassten Fragebogen zu Schülervorstellungen, Schülerinterviews und Videoaufzeichnungen. Aus den Antworten der Schülerinnen und Schüler wurden Begriffscluster gebildet und Begriffsraster (Concept Maps) entwickelt, mit denen sich die Vorstellungen und ihre Entwicklung grafisch veranschaulichen lassen.

Lichtfeldt untersuchte 11 Berliner Grund- und Leistungskurse als Erprobungsgruppe seiner Evaluation. Diese Ergebnisse wurden mit den Resultaten von 14 herkömmlich unterrichteten Grund- und Leistungskursen verglichen, die als Kontrollgruppe dienten. Da es an dieser Stelle um eine Übersicht über existierende Schülervorstellungen geht, werden die von Lichtfeldt gefundenen Ergebnisse im folgenden für Erprobungs- und Kontrollgruppe zusammen wiedergegeben. Bei quantitativen Aussagen über die Häufigkeit von Schülervorstellungen nach dem Unterricht wird auf die Ergebnisse der Kontrollgruppe zurückgegriffen.

### Schülervorstellungen vor dem Quantenphysik-Unterricht

Vor dem Unterricht ergaben sich die folgenden Vorstellungsmuster in Bereichen, die im Zusammenhang mit der Quantenmechanik stehen:

- **Vorstellungen vom Licht**

Auf die Frage: "Was ist Licht wirklich" gaben 43% der Schüler eine Antwort, die einer reinen Wellenvorstellung entsprach (im Begriffscluster "Welle" eingeordnet werden konnte). 7,3% antworteten im Sinne einer reinen Teilchenvorstellung. Interessant ist, dass auch vor dem Unterricht über Quantenphysik 40% der Schülerinnen und Schüler eine "dualistische" Auffassung vertraten. Von Lichtfeldt (1992a) für diese Kategorie angeführte Beispiele sind:

- Eine Energieform, die einerseits Eigenschaften von Wellen aufweist, andererseits aber auch die von kleinsten Teilchen.
- Da sich die Vorstellung von Licht dem menschlichen Gehirn entzieht, kann man es nur als Mittelding zwischen zwei herkömmlichen Theorien ansehen, nämlich zwischen Welle und Teilchen, da es sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften aufweist.
- Licht besteht aus Strahlen, Wellen und Quanten.

Lichtfeldt schreibt: "Die Auswertung der Schülerantworten zeigt ein bemerkenswertes Ergebnis: Bereits fast 48% der befragten Schüler haben eine Vorstellung von Teilchen bei der Frage nach dem wahren Lichtcharakter (Addition der Cluster "Teilchen" und "Dualismus"). Dies ist insofern erstaunlich, da die Schüler im Physikunterricht die Energiequantelung des Lichts noch nicht kennengelernt haben, sich somit auch keine Teilchenvorstellung gebildet haben könnte" (Lichtfeldt 1992a).

Die Schülerinnen und Schüler, die bereit sind, zwei Erklärungsmodelle nebeneinander gleichberechtigt nebeneinander existieren zu lassen, "sehen darin keinen Widerspruch, was in manchen Aussagen auch deutlich verbalisiert wird. Der klassische Dualismus ist bei diesen Schülern bereits vorgeprägt und er bedarf im Unterricht nicht erst noch der Problematisierung, da die Schüler ihre Vor-



stellungen bestätigt fänden und das eigentlich Neue der quantenphysikalischen Lichtbetrachtung nicht empfinden" (Lichtfeldt 1992a).

- **Atome und ihre Bausteine**

Auf die Frage "Gibt es kleinere Teilchen als Atome?" antworteten 91,6% der Befragten positiv. Lichtfeldt schreibt hier den im Chemieunterricht vermittelten Vorstellungen eine große Bedeutung zu.

Wenn nach der Beziehung zwischen Proton und Elektron gefragt wird, verändern die Schülerinnen und Schüler ihr Antwortverhalten. 21,9% äußern sich weiterhin im Sinne von "Bausteine" (z. B. "Proton und Elektron gehören zu einem Atom, müssen aber nicht vorhanden sein"). Sehr viel mehr Schüler gehen hier auf Ladungsaspekte ein: "Gleich viele Ladungsteile im Atom enthalten (Anzahl der Protonen = Anzahl der Elektronen). Daraus folgt: Atom ist neutral".

- **Bilder des Wasserstoffatoms**

Die Schülerinnen und Schüler wurden gebeten, ein Bild des Wasserstoffatoms nach ihren Vorstellungen zu zeichnen. Dabei zeigte sich eine starke Dominanz des Bohrschen Atommodells: 70% aller Schülerzeichnungen konnten unter "Bohr" klassifiziert werden (auf Bahnen um den Kern laufende Elektronen). Dabei finden die Bohrschen Postulate in den Darstellungen keine Erwähnung oder Beachtung (es bietet sich also eher der Begriff "Planetenmodell" zur Beschreibung der Zeichnungen an). 21,9% der Schülerinnen und Schüler lieferten Darstellungen, die sich unter "Elektronenwolke" einordnen ließen ("verschmierte" Wolke um den Atomkern, manchmal mit dem Hinweis versehen: "Man weiß nicht, wo sich das Elektron befindet"). Schließlich zeichneten 6,9% der Schülerinnen und Schüler Bilder, die an die chemischen Strukturformeln von Molekülen erinnerten und die deshalb unter "Hantel" zusammengefasst wurden.

- **Stabilität der Atome**

Beim Antwortverhalten auf die Frage, warum Atomkern und Elektronen nicht "zusammenkleben" sieht Lichtfeldt einen direkten Zusammenhang mit den bildlichen Darstellungen des Wasserstoffatoms. 62,5% der Schülerantworten lassen sich in die Kategorie "Kreis" zusammenfassen, die die folgende Vorstellungen beinhaltet: Elektronen fliegen auf festen Kreisbahnen um den Kern. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft und Coulomb-Kraft ein.

Unter "Ladung" werden die Schülerinnen und Schüler eingeordnet, "die eine statische Vorstellung einer Ladungsabstoßung haben. Dabei werden häufig die Ladungseigenschaften falsch dargestellt. Die jeweilige Ladung von Proton und Elektron bewirkt einen Abstand zwischen den beiden Teilchen (ähnlich einer Dipolhantel). Die Schüler setzen sich aus ihren einzelnen Wissens-elementen das "passende" Bild zusammen" (Lichtfeldt 1992a). 22,5% der Schülerinnen und Schüler lassen sich in diese Kategorie einordnen.



Schließlich gibt es mit 7,9% noch die Kategorie "Schale", die die Vorstellung einer festen Hülle (Schale, Kugel, ...) umfasst, auf der die Elektronen sitzen oder sich bewegen.

Lichtfeldt (1992a) fasst die Ergebnisse seiner Untersuchungen zu vorunterrichtlichen Vorstellungen folgendermaßen zusammen: "Bei der umfassenden Betrachtung der Antworten aller Items, die den Schülern zur Beantwortung vorgelegt worden sind, lässt sich eine eindeutige Zielrichtung der Vorstellungen der Schüler feststellen. In ihrem gesamten Antwortverhalten und damit auch in ihrer "kognitiv internen" Denkweise sind die Schüler durch den vorangegangenen Unterricht geprägt. Sie haben versucht, die in der Schule angebotenen Erklärungen in ihre bereits vorhandenen Vorstellungsmuster einzubeziehen. Eine Vorliebe für ein einzelnes Erklärungsmuster ist dabei nicht entstanden. So lassen Schüler bei Fragen zum Licht und bei allgemeiner Fragestellung mehrere Erklärungsmuster widerspruchsfrei zu. Die Schüler gebrauchen sie gerade so, wie es ihnen für die Erklärung oder Lösung der gestellten Aufgabe notwendig erscheint. [...] Die überwiegende Mehrheit [der Schüler verhält sich] je nach Themenbereich und Fragestellung unterschiedlich. Dies könnte als Indiz für ihre starke Bereitschaft, zwischen einzelnen Vorstellungen zu pendeln und Mischformen zu bilden, gewertet werden [...]. Diese Mischformen bewegen sich jedoch immer im Rahmen einer sehr stark mechanistisch orientierten Vorstellung".

### Schülervorstellungen nach dem Quantenphysik-Unterricht

Nach dem Unterricht über Quantenphysik kann eine umfangreichere Palette von Themen untersucht werden. Es ist jedoch auch interessant, die durch den Unterricht erfolgte Veränderung der bereits betrachteten Vorstellungsbereiche zu untersuchen. Wie bereits erwähnt beziehen sich quantitative Angaben auf die Kontrollgruppe.

- **Beziehung zwischen Licht und Photon**

Indem die Schülerinnen und Schüler das Begriffspaar Licht-Photon kommentieren sollten, wurden sie dazu herausgefordert, sich mit dem Teilchencharakter des Lichts auseinanderzusetzen. 74,5% der Schülerinnen und Schüler wurden dann auch dem Cluster "Teilchen" zugeordnet ("Licht besteht aus Photonen"). 17,9% antworteten im Sinne eines Dualismus, z. B. "Licht besteht aus gequantelten Energieportionen, den Photonen, denen Wellen- und Teilcheneigenschaften zugeordnet werden können". Den Modellcharakter der Beschreibung thematisierten 7,5% der Schülerinnen und Schüler mit Äußerungen wie: "Photon: Bezeichnung für ein Vorstellungsmodell der Lichtteilchen."

- **Beziehung zwischen Licht und Welle**

Umgekehrt soll mit der Frage nach dem Begriffspaar Licht-Welle der Wellencharakter von Licht angesprochen werden. Während in der vorangegangenen Frage eine reine Wellenvorstellung nicht mehr feststellbar war, erwähnen hier 34% der Schüler alleine den Wellenaspekt: "Licht zeigt bei seiner Ausbreitung

Wellencharakter". 51,9% äußerten sich im dualistischen Sinn, 12,3% gingen auf den Modellcharakter der Beschreibung ein.

- **Was ist Licht wirklich?**

Diese Frage hat ihr Gegenstück in den Befragungen vor dem Unterricht. Die Verteilung über die Kategorien sieht nun folgendermaßen aus: 13,3% reine Wellenvorstellung, 7,6% reine Teilchenvorstellung, 65,7% dualistische Vorstellungen (darunter sind Antworten zusammengefasst, in denen Wellen- und Teilchenvorstellung so verknüpft sind, dass sie "sowohl als auch" existieren: "Licht hat Wellen- und Teilchencharakter", "Eine Welle, wenn man die Gesamtheit der Photonen betrachtet, sonst eine Ansammlung von Photonen"). Dazu kommt mit 4,8% die Kategorie "Quant", in der vorsichtigere Äußerungen über den wahren Charakter des Lichts erfasst sind: "Die Frage lässt sich nicht so beantworten, da Licht unter verschiedenen Vorstellungen pendelt: Einerseits Wellenvorstellung und andererseits Teilchenvorstellung."

Lichtfeldt fasst die Ergebnisse des Unterrichts zur Natur des Lichts in der Kontrollgruppe folgendermaßen zusammen: "In der Kontrollgruppe hingegen sind bei den Schülern Verfestigungen dualistischer Vorstellungen entstanden. Mehr als 60% der Schüler bewegen sich mit ihren Antworten im Feld der Cluster "Welle", "Teilchen" und "Dualismus". Sie bleiben in ihren Antworten nicht konsequent bei Welle oder Teilchen, so dass insgesamt von einer stabilen dualistischen Vorstellung – Licht ist sowohl Welle als auch Teilchen – gesprochen werden kann. [...] Die Ursachen der Stabilisierung sollten [...] im Zusammenspiel von Einführung der Lichtquantisierung und vorhandenen Schülervorstellungen gesehen werden. Schüler kommen mit einer hohen Bereitschaft in den Physikunterricht, Modelle so zu benutzen, wie es gerade in ihre jeweilige Vorstellungswelt passt. [...] Da die Schüler in dem Sinne keine kognitiven Konflikte erfahren, ist der Modellbegriff nicht notwendig geworden und das Lichtquant ist zur "greifbaren" Wirklichkeit erwachsen" (Lichtfeldt 1992a).

- **Vorstellungen von freien Elektronen**

Auch im Fall freier Elektronen wurden die Schülerinnen und Schüler gebeten, Beziehungen zwischen Wortpaaren zu beschreiben. Im Fall der Beziehung Elektron-Welle antworteten 29,8% im Sinne einer reinen Wellenvorstellung, 5,3% mit einem reinen Teilchenansatz ("Elektronen sind Elementarteilchen"); 53,2% äußerten dualistische Vorstellungen ("Elektronen bewegen sich wellenförmig um den Kern", "Ein Elektronenverband (mehrere Elektronen) verhält sich wie eine Art Welle / Wellencharakter des Elektrons"). Dieser dualistische Ansatz „kommt in den Antworten von Schülern zum Ausdruck, die das Elektron in seiner Körper-eigenschaft nicht hinterfragen, ihm aber noch zusätzlich Eigenschaften zuge-stehen, die eine Wellenbetrachtung ermöglicht. Das Elektron hat jetzt diese Welleneigenschaft, indem es sich wellenförmig oder schwingend bewegt [Modell

eines auf der Welle "reitenden" Elektrons; R. M.]" (Lichtfeldt 1992a). Bemerkenswert ist, dass sich keine Schüler aus Lichtfeldts Kontrollgruppe in die Kategorie "Quant", (d. h. vorsichtiger Umgang mit der Dualismusproblematik) zuordnen lassen.

Umgekehrt antworten bei der Beziehung Elektron-Teilchen 78,6% der Schüler mit einem reinen Teilchenmodell. Ein reines Wellenmodell fehlt völlig, 15,3% äußern dualistische Vorstellungen. 3,1% antworten im Sinn der Kategorie "Quant", 2,0% betonen die Modellhaftigkeit der Vorstellungen.

### • **Interferenz von Elektronen**

Die Schülerinnen und Schüler wurden gebeten, die Wortpaare Elektron-Beugung und Elektron-Interferenz zu kommentieren. Lichtfeldt stellt in der Kontrollgruppe eine niedrige Bereitschaft zur Beantwortung dieser Frage fest. Er wertet dies als Unsicherheit, einen "Zusammenhang zwischen einem realen Teilchen und einem Wellenphänomen" zu sehen. Die Schülerantworten werden wie bei den vorherigen Items in die Kategorien "Welle", "Teilchen", "Dualismus", "Modell" und "Quant" eingeordnet, wobei in der hier betrachteten Kontrollgruppe nur die ersten drei Kategorien in nennenswerter Anzahl auftreten.

Als Beispiele für Schüleräußerungen zur Kategorie Welle gibt Lichtfeldt (1992a) die folgenden Beispiele an:

- Elektronen werden am Spalt wie Licht gebeugt. Daraus folgt die Theorie der Welle.
- Elektron hat Welleneigenschaften, daher kann es am Spalt gebeugt werden.
- Interferenz aufgrund der De-Broglie-Welle der Elektronen.
- Elektronen können miteinander interferieren und sich eventuell auslöschen (Welle).

Zur Kategorie Teilchen zählen die folgenden Äußerungen:

- Ein Elektronenstrahl lässt sich an scharfen Kanten beugen.
- Beim Doppelspaltversuch tritt eine Beugung der Elektronen auf, denn der Begriff der Welle wurde für die Elektronen widerlegt.
- Elektronen werden beim Durchfliegen eines Spaltes in ihrer Bewegungsrichtung gebeugt.
- Elektron ist ein winziges negativ geladenes Teilchen und geht zur Anode. Elektronen verhalten sich wie Photonen, daher Interferenz.
- Elektronen zeigen keine Interferenz. Ein Elektron ist ein Teilchen.

Bei den dualistischen Äußerungen spielt nach Lichtfeldt "der dynamische Aspekt der Elektronen eine Rolle, der nur den bewegten Elektronen die Welleneigenschaften zuordnet" (Lichtfeldt 1992a).

- Da das Elektron bei Bewegung eine De-Broglie-Wellenlänge hat, kann es gebeugt werden.
- Das Elektron ist nicht der auslösende Faktor für die Beugung, es können nur Wellen gebeugt werden. Wird ein Elektron aus der Materie herausgelöst, so erhält es eine bestimmte Frequenz, jedoch besteht zwischen beiden keine direkte Beziehung.
- Schnelle Elektronen verhalten sich wie Licht. Daraus folgt: Es ist auch Interferenz vorhanden.

- **Bilder des Wasserstoffatoms**

Dieses Item entspricht direkt dem entsprechenden vor dem Quantenphysikunterricht. Die Klassifizierung in Kategorien ist die gleiche wie oben. In der hier betrachteten Kontrollgruppe ist immer die Vorstellung "Bohr" dominant (57,8%). Der Anteil der Schülerinnen und Schüler, die eine Zeichnung der Kategorie "E-Wolke" liefern, hat sich nur unwesentlich erhöht (25,2%). Bilder der Kategorie "Hantel" wurden von 3,9% gezeichnet. 10,8% zeichnen kein Bild. Diese Kategorie trat vor dem Quantenphysikunterricht nicht auf. Lichtfeldt (1992a) schreibt: "Diejenigen Schüler, die sich deutlich von einer möglichen bildlichen Darstellung des Wasserstoffatoms distanzieren, diese sogar nicht einmal mehr modellmäßig zulassen wollen, sind im Cluster "kein Bild" erfasst. Diese Schüler wählen verbale Beschreibungen für ihre Vorstellungen vom Wasserstoffatom, die jetzt rein abstrakter Form sind oder entsprechend aus dem klassischen Bild so abgeleitet werden".

- **Stabilität der Atome**

Auch dieses Item hat sein unmittelbares Gegenstück in der Befragung vor dem Unterricht. Dominante Vorstellung in der Kontrollgruppe ist nach wie vor die Kategorie "Kreisbahn" (Gleichgewicht zwischen Coulomb- und Zentrifugalkraft). Mit 60,8% ist der Anteil dieser Kategorie nach dem Unterricht nahezu unverändert. Ladungsargumente werden von 10,8% der Schülerinnen und Schüler gebracht. Der Kategorie "Schale" (feste Hülle, auf der sich die Elektronen befinden) lassen sich 12,7% der Schülerinnen und Schüler zuordnen (im Vergleich zu 7,9% vor dem Unterricht).

Neu ist die Kategorie "Lokalisation". Sie zeugt "von Vorstellungen, die sich deutlich von den klassischen mechanischen Anschauungen der Atome absetzen. Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation wird als Erklärungshilfe für die Nullpunkts- oder Lokalisationsenergie herangezogen sowie bei der Ablehnung einer festen Ortsangabe benutzt" (Lichtfeldt 1992a). 5,9% der Schülerinnen und Schüler ließen sich nach dem Unterricht dieser Kategorie zuordnen.

Lichtfeldt (1992a) kommentiert die nachunterrichtlichen Vorstellungen zu Atomen in seiner Kontrollgruppe folgendermaßen: "In der Kontrollgruppe hingegen sind bei gut 60% der Schüler die alten Vorstellungen eines mechanistisch geprägten Bildes erhalten geblieben. Neue Begriffe, wie z. B. die Wahrscheinlichkeit, werden so eingebaut, dass sie als passend angesehen werden. Auch in den Antworten der Schüler, die im Cluster "Ladung" und im Cluster "Schale" erfasst sind, sind Vorstellungselemente von Bahnen enthalten, die auf die starke Behandlung des Bohr'schen Bahnenmodells im Unterricht zurückzuführen sind. Werden alle diese Schüler zusammengefasst, erreicht man mit mehr als 80% fast die Angaben, die Bethge in seiner Untersuchung macht".

Die Vorstellungen zu freien Elektronen fasst Lichtfeldt (1992a) wie folgt zusammen: "[Die Schüler verharren] in klassischen Gedankenbildern, die auf ein Sich-nicht-Lösen-

Können von den bisherigen Vorstellungsmustern hinweisen. Über alle Items, die die freien Elektronen betreffen, sind die Schüler der Kontrollgruppe zu mehr als 80% [...] mit klassischen Argumentationen wiederzufinden [...]. Die Schüler scheinen die neuartigen Phänomene der Elektronen, insbesondere bei der Beugung und Interferenz so in ihre Vorstellungen integriert zu haben, dass sie ihren "latenten" Dualismus des Lichts auf die Elektronen übertragen. Je nach Argumentationsnotwendigkeit wird das Wellenbild, das Teilchenbild oder das gleichzeitige Bild in den Vordergrund gestellt. Zugrunde liegt diesen Argumentationen sicherlich ein klassisches Bild realer Elektron-Teilchen, die sich wellenförmig fortbewegen".

#### 4. Die Studie von Petri

In der Bremer Gruppe wählte Petri einen Zugang zur Untersuchung von Schülervorstellungen zur Quantenmechanik, der sich nicht auf die Erfassung der Vorstellungen einer Schülerpopulation zu einem gegebenen Zeitpunkt konzentrierte, sondern der die Vorstellungsentwicklung eines einzelnen Schülers über einen längeren Zeitraum verfolgte (Petri 1996, Petri und Niedderer 1998). Petri ist damit stärker an den *Prozessen* interessiert, die in Bezug auf die Vorstellungen beim Lernen der Quantenphysik ablaufen. In Anlehnung an Niedderer und Goldberg (1995) fasst Petri den Lernprozess als einen "Lernpfad" auf, d. h. "als Abfolge von (relativ) stabilen Zuständen eines individuellen kognitiven Systems" (Petri 1996). Diesen Lernpfad versucht Petri in seiner Untersuchung aufzudecken und zu beschreiben.

In seiner Studie analysiert Petri den Schüler Carl, der einen Leistungskurs Physik besucht. Der Kurs wurde nach dem Bremer Unterrichtskonzept unterrichtet; Petri betont indessen, dass nicht die Evaluation des Unterrichtskonzepts Ziel seiner Arbeit sei, sondern die Analyse eines individuellen Lernprozesses. Petri stützt sich auf die Analyse von Unterrichtstranskripten, auf Transkripte von Gruppenarbeitsphasen sowie auf mehrere halbstrukturierte Interviews.

Petri beschreibt seinen Ansatz zur Erfassung der kognitiven Zustände des Schülers Carl folgendermaßen: "Der Lernprozess eines Schülers wird über eine Abfolge von über einen Zeitraum von Tagen oder Wochen stabilen "Zuständen des kognitiven Systems" dargestellt. Ein einzelner kognitiver Zustand beschreibt den jeweiligen gegenwärtigen "Lernzustand" des Schülers. Das kognitive System eines Schülers wird durch die Inhalte und die logischen Verknüpfungen seiner Elemente gebildet. Kognitive Elemente sind Hypothesen über stabile Bewusstseinsinhalte eines Schülers, die aus den Handlungen und Äußerungen etc. des Schülers in einem iterativen hermeneutischen Interpretationsverfahren konstruiert werden" (Petri 1996).

Der **Ausgangszustand** (Zustand nach einem einführenden Unterrichtsabschnitt in die Quantenphysik) des kognitiven Systems von Carl bezüglich der Vorstellungen zur Quantenphysik wird von Petri (1996) folgendermaßen beschrieben:

- *Quantendefinition*: Ein Quant hat sowohl Teilcheneigenschaften wie Energie und Impuls, als auch Welleneigenschaften wie Frequenz und Wellenlänge. Das Elektron ist ein Quant.
- *Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation*: Der Faktor  $h$  in der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist das Maß für die prinzipielle Ungenauigkeit der Berechenbarkeit des Wertes einer physikalischen Größe. Ort und Bewegungsrichtung eines Quants sind nicht gleichzeitig exakt bestimmbar. Die Bahn eines Quants ist daher nicht genau berechenbar.
- *Atomvorstellung*: Carls Atomvorstellung ist am Anfang mit der Planetenvorstellung identisch.

Im Laufe der kognitiven Entwicklung treten bei Carl die folgenden **Zwischenzustände** von Vorstellungen auf:

- *Erste Quantenvorstellung*: Carls erste Quantenvorstellung wird von Petri als "wellengeleitetes Elektron" bezeichnet: "Das Elektron ist ein winziges massives Kügelchen (Teilchen). Das Elektron bewegt sich auf einer geradlinigen Bahn. Dabei wird es von einer Welle begleitet. Die Welle wird gebeugt und zeigt Interferenzerscheinungen. Dadurch wird die Richtung der Elektronenbahn nicht mehr genau berechenbar."
- *Erster Zwischenzustand der Atomvorstellung*: Hier existieren Planetenmodell und Hüllenmodell gemeinsam. Die Vorstellung des Hüllenmodells gibt Petri (1996) wie folgt wieder: "Das H-Atom besteht aus dem Atomkern und der Elektronenhülle. In der Hülle kreist das Elektron auf einer nicht genau bestimmten Bahn um den Atomkern. Das Elektron ist ein winziges massives Kügelchen (Teilchen). Der Bahnradius wird durch das Maximum der  $\Psi$ -Funktion bestimmt. Denkt man sich die  $\Psi$ -Funktion in alle Richtungen vom Atomkern weggeführt, ergibt sich ein wellenartiges Möglichkeitsfeld für die Bahn des Elektrons. Aufgrund der Radialsymmetrie ergibt sich eine hautdünne Hülle (Kugeloberfläche), auf der sich das Elektron bewegen kann. Die Umlaufrichtung der Bahn ist unbekannt".

Petri unterscheidet Stärke und Status der beiden Vorstellungen. Die Stärke der Planetenvorstellung ist bei Carl wesentlich größer als die des Hüllenmodells (es wird z. B. schneller aktiviert). Letzteres genießt dafür einen höheren Status. Petri schreibt: "Carl signalisiert an einer Stelle, dass er "noch nicht von den Bahnen wegkommt", d. h. er hat offenbar schon registriert, dass der Lehrer z. B. über die unterschiedlichen Zustände, die ein Quant je nach experimenteller Situation einnimmt, gegen eine Bahnvorstellung argumentiert. Er setzt dies anschaulich jedoch bisher nicht um und verwendet den Zustandsbegriff bis dato in diesem Zusammenhang nicht. Eine auf die Anschauung "durchschlagende" Wirkung des "Bahnverbots" und des Zustandsbegriffes ist in Carls kognitivem System noch nicht festzustellen."



- *Zweite Quantenvorstellung*: Sie wird als "Zustand Welle oder Zustand Elektron" bezeichnet: "Der Zustand eines Quants ist dessen momentaner Charakter. Ein Quant ist, sofern man sich auf Elektronen bezieht, entweder im Zustand Welle oder im Zustand Elektron. Der Zustand Welle wird durch das Möglichkeitsfeld bzw.  $\Psi$ -Funktion beschrieben. Bei einer Lokalisation befindet sich das Quant kurzzeitig im Zustand Elektron. Im Zustand Elektron verhält sich ein Quant so, als ob es ein richtiges Elektron (Teilchen, Objekt) wäre".
- *Zweiter Zwischenzustand der Atomvorstellung*: In Carls zweiter Zwischenvorstellung zum Atom koexistieren Planetenmodell und das "Luftballonmodell". Petri beschreibt das Letztere wie folgt: "Das H-Atom besteht aus dem Atomkern und der Elektronenhülle. Die Hülle (den Luftballon) bildet das durch die  $\Psi$ -Funktion beschriebene radialsymmetrische Möglichkeitsfeld zur Lokalisation des Elektrons. Das Möglichkeitsfeld umfasst den "Zustand Elektron". Das Elektron ist ein winziges massives Kügelchen (Teilchen). Es bewegt sich nicht und existiert nur im Moment der Lokalisation. (Der angepiekste Luftballon zieht sich auf einen Punkt zusammen). Das Luftballonmodell geht aus dem Planetenmodell in deutlicher Abgrenzung hervor. Die Bewegung des Elektrons wird "gestoppt". Die Existenz des Elektrons ist auf kurze Momente beschränkt. Gleichzeitig wird die  $\Psi$ -Funktion bzw. das Möglichkeitsfeld bzw. der "Zustand Elektron" bzw. der Luftballon um den Atomkern hinzugedacht".

Ähnlich wie beim ersten Zwischenzustand der Atomvorstellung hat das Planetenmodell immer noch eine größere Stärke als das Luftballonmodell, dafür ist der Status des Luftballonmodells höher.

Schließlich wird der **Endzustand** von Carls Vorstellungen zur Quantenphysik folgendermaßen beschrieben:

- *Quantenvorstellung*: Das Elektron ist ein winziges massives Kügelchen (Teilchen). Das Elektron selbst bewegt sich nicht, es befindet sich auf der Wellenfront. Die Welle breitet sich aus und erzeugt Beugungs- und Interferenzphänomene. Das Elektron reitet auf der sich ausbreitenden Wellenfront. Die Welle definiert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons.
- *Atomvorstellung*: Drei Vorstellungskerne koexistieren bei Carl: Das schon oben beschriebene Planetenmodell, das Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodell und das Ladungswolkenmodell. Das Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodell ist dadurch charakterisiert, dass die Elektronen sich in durch die  $\Psi$ -Funktion definierten Aufenthaltsräumen befinden, wo sie sich nicht bewegen. Im Ladungswolkenmodell besteht ein Atom aus dem Atomkern und einer statischen Elektronenladungswolke. Die Elektronen werden als "verschmiertes Etwas" aufgefasst.



Petri (1996) beschreibt die Beziehungen zwischen den drei Modellen folgendermaßen: "Das Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodell geht aus dem Planetenmodell in deutlicher Abgrenzung hervor. Die Bewegung des Elektrons wird "gestoppt". Die Aufenthaltsbereiche des Elektrons sind wesentlich größer (Orbital statt Orbit). Das Ladungswolkenmodell entsteht in weiterer Abgrenzung von beiden Modellen. Das Elektron als Teilchen wird in eine statische Ladungswolke aufgelöst". Zur Stärke und zum Status der Modelle schreibt Petri: "Das Planetenmodell wird spontan assoziiert. Die anderen Modelle werden bewusst davon abgegrenzt. Diese Abgrenzung ist beim Ladungswolkenmodell wesentlich konsequenter, deutlicher und expliziter". Der Status des Ladungswolkenmodells ist für Carl am höchsten, wobei er "der Intention des Lehrers [folgt], der insbesondere das Ladungswolkenmodell klar favorisiert". Das Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodell wird als quantenmechanisches Modell gesehen und hat einen höheren Status als das Planetenmodell.

### 5. Studien im englischsprachigen Raum

Die Untersuchung von Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zur Quantenmechanik hat im englischsprachigen Raum erst relativ spät eingesetzt. Das mag damit zusammenhängen, dass die Quantenmechanik in den angelsächsischen Ländern im Allgemeinen reiner Universitätsstoff ist, der in spezialisierten Kursen für Physikstudenten angeboten wird.

*Masshadi* (1996a, 1996b) hat eine Studie durchgeführt, in dem 57 englische A-Level Physiksüler einen Fragebogen mit teils offenen, teils vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ausfüllten. Inhaltlich bezogen sich die Fragen auf Vorstellungen zum Atom und zur Interferenz von Elektronen. Die Schülerinnen und Schüler wurden mit teilweise umgangssprachlich formulierten Aussagen konfrontiert, zu denen sie Stellung nehmen sollten. Beispiele sind: "People sometimes say that the structure of the atom is similar to the structure of the solar system (i.e. planets in orbit around the sun). Do you agree with this?" oder "Student C remarks: The pattern does look very like the diffraction patterns we were getting when we looked at the diffraction of light But this must be just a coincidence, as light and electrons are very different things. Why should he say this? Do you agree with him?".

Masshadi fasst seine Ergebnisse folgendermaßen zusammen (alle folgenden Zitate aus Masshadi (1996b)):

- **Atomvorstellung**

In diesem Bereich unterscheidet Masshadi fünf Vorstellungskategorien:

1. *Mechanistisches Bild*: Diese Vorstellung umfasst das Bild (vieler) sich schnell bewegender Elektronen auf bestimmten Bahnen: "Because electrons orbit so fast that we can't tell where one is at any time – therefore it is inaccurate to draw them at one place". Masshadi unterscheidet das mechanistische Bild von

der Vorstellung des Bohrschen Atommodells: "Not only was there no mention of Bohr's postulates but the term 'Bohr model or atom' was not explicitly mentioned by the students". Etwa 25% der Schülerinnen und Schüler hingen dieser Vorstellung an.

2. *Probabilistisches Bild*: Ebenfalls etwa 25% der Schülerinnen und Schüler waren der Meinung, dass Elektronenwolken zu einem probabilistischen Bild führen, hatten aber immer noch die Vorstellung von Elektronen als Teilchen: "You can't say where you will find an electron, only draw in areas or more correctly volumes where there is a greater than 95 per cent chance of finding an electron".
3. *"Random motion"-Bild*: In diesem Bild koexistieren mechanistische und probabilistische Vorstellungen (Zufallsbewegungen in einer Region oder "auf einer Schale"): "Electrons do not move in a circle around the nucleus, like a planet does around the sun, instead it moves randomly but in the shape of a certain shell, therefore we can predict that at one instant the electron may be at that point but we can never be sure, therefore they draw a cloud". Nach Masshadi hatten etwa 23% der Schülerinnen und Schüler diese Vorstellung.
4. *Verschmierte Ladungswolke*: Diese Vorstellung wurde von etwa 10% der Schülerinnen und Schüler angesprochen.
5. *Keine Visualisierung möglich*: Etwa 5% der Schülerinnen und Schüler waren der Meinung, dass eine Visualisierung von Atomen nicht möglich ist.

- **Elektronenvorstellungen**

Der zweite von Masshadi untersuchte Vorstellungskomplex bezog sich auf Elektronen. Hier fand er folgende Antwortkategorien:

1. *Klassische Teilchen*: Selbst nach der Konfrontation mit der Elektronenbeugung bekannte sich knapp ein Drittel der Schülerinnen und Schüler zur reinen Teilchenvorstellung von Elektronen: "This implies that electrons are waves, and so must be nonsense because electrons behave like particles, therefore cannot interfere either constructively or destructively".
2. *Elektronen als Wellen*: Knapp zwei Drittel der Befragten äußerten nach dem Elektronenbeugungsexperiment die Vorstellung von Elektronen als Wellen. Masshadi differenziert nicht weiter nach der genauen Natur dieser Vorstellung.
3. *Andere Vorstellungen*: Nur wenige Studenten (ca. 4%) äußerten die Vorstellung einer Wahrscheinlichkeitswelle. Ebenfalls 4% sprachen vom Elektron als einer verschmierten Ladung. Wiederum 4% waren der Meinung, dass es weder sinnvoll noch wünschenswert sei, sich eine Vorstellung von Elektronen zu bilden.

*Styer* (1996) betrachtet "Common misconceptions regarding quantum mechanics". Seine Studie bezieht sich aber vor allem auf die Inhalte, die üblicherweise in einer theoretischen Quantenmechanik-Vorlesung behandelt werden. Sie konzentriert sich in der Hauptsache auf Fehlvorstellungen zum quantenmechanischen Formalismus und soll daher hier nicht näher vorgestellt werden.

*Johnston, Crawford und Fletcher* (1998) und *Fletcher und Johnston* (1999) untersuchten Undergraduate-Studenten an einer australischen Universität. In ihrer Untersuchung stellten sie sich die Fragen, (1) welches die wichtigsten Konzepte sind, die die Studenten verstehen müssen, um Quantenmechanik erfolgreich zu lernen und (2) wie die Vorstellungen von Studenten zu den Ideen der Quantenmechanik sind, die diese besonders schwierig zu lernen machen.

Johnston et al. benutzten Fragebogen, um die Studenten zu untersuchen. Eine Beispielfrage ist: "Your friend has also read that 'quantum mechanical particles can also exhibit wave properties'. What would you say are the defining properties of a wave?". Sie berichten über das Antwortverhalten der Studenten auf drei Fragen: (1) Was verstehen Sie unter einem Teilchen, (2) Was verstehen Sie unter einer Welle, (3) Was ist der Unterschied zwischen "indeterminacy" und "uncertainty".

Für die im vorliegenden Kontext interessanteste Frage (3) ergaben sich die folgenden Attribute, die die Studenten den beiden Begriffen zuschrieben (abnehmende Nennungshäufigkeit): (a) *Indeterminacy*: Unpredictability, Measurement error, Hidden variables, Cannot predict probability, Probability; (b) *Uncertainty*: Measurement error, Probability, Heisenberg, Measurement distance, Unpredictability.

*Steinberg, Wittmann, Bao und Redish* (1999) werfen die Frage auf, inwieweit die bekannten Lernschwierigkeiten in der Wellenoptik das anschließende Verständnis der Quantenmechanik (Photonen) beeinflussen. *Bao, Redish und Steinberg* (1999) hingegen konzentrieren sich auf das Verständnis der Wellenfunktion, die Studenten der Ingenieurwissenschaften nach einer Vorlesung über Quantenmechanik entwickeln. Betrachtete Systeme sind Potentialstufen, vor allem im Hinblick auf den Tunneleffekt. Die verbreitetste Fehlvorstellung, die Bao et al. finden, ist, dass die Amplitude der Wellenfunktion proportional zur kinetischen Energie der Elektronen ist. Darüber hinaus stellen sie fest, dass klassisches Teilchenmodell und quantenmechanisches Wahrscheinlichkeitsmodell im Zusammenhang mit dem Tunneleffekt koexistieren können.

*Ireson* (2000) untersuchte 342 britische Oberstufenschüler (CGE advanced level students). Etwa die Hälfte davon hatte einen Kurs über Quantenphysik besucht, die andere Hälfte nicht. Die Antworten der Schülerinnen und Schüler zu einem Fragebogen mit 29 Items, die die Quantenphysik betrafen, wurden einer Clusteranalyse unterzogen.

In der Gruppe der Schüler ohne Quantenphysik-Unterricht fand Ireson die folgenden Cluster (charakterisiert durch häufig gemeinsam auftretende Aussagen): (1) "*Structure and mental image of entities*". Dieser Cluster enthält Aussagen wie: "Elektronen bewegen sich auf Wellenbahnen um den Kern" oder "Ein Atom kann man sich nicht vorstellen".

(2) *Mechanistisches Denken (bestimmte Bahn)*. Diese Vorstellung beinhaltet das Bild von Elektronen auf einer bestimmten Bahn um den Kern. (3) *Quantenmechanische Vorstellung*. Als Beispielaussagen für diese Kategorie gibt Ireson z. B. an: "The photon is a sort of energy particle" und "How one thinks of the nature of light depends on the experiment being carried out". (4) *"Conflicting mechanistic thinking"*. Beispiele für diese Kategorie sind die folgenden Aussagen: "Electrons are fixed in their shells" oder "Light always behaves like a wave".

Nach Ireson deuten Cluster 2 und 4 auf "confusion in the minds of the students" hin (z. B. geben die Studierenden in diesen Kategorien widersprüchliche Aussagen an). Leider nennt Ireson keine Zahlen über die Verteilung der Studierenden über die Kategorien.

Die Schülerinnen und Schüler, die einen Quantenphysik-Kurs besucht haben, lassen sich mit drei Clustern erfassen: (1) *Quantenmechanische Vorstellungen* (Vorstellungen wie oben beschrieben). (2) *"Conflicting quantum thinking"*. Beispiele dazu sind: "The structure of the atom is similar to the way planets orbit the sun"; "It is possible for a single photon to constructively and destructively interfere with itself". (3) *Conflicting mechanistic thinking*, mit Aussagen wie: "Electrons are waves", "The electron is always a particle", "The photon is a small, spherical entity".

Leider gibt Ireson auch in diesem Bereich nicht die Verteilung der Schüler über die einzelnen Cluster. Er untersucht aber die Unterschiede der beiden Gruppen und führt die Differenzen auf die Wirkung des Quantenphysik-Unterrichts zurück. Er kommentiert dies mit der folgenden, recht pessimistischen Aussage: "By considering those items showing significant difference at the 0.01 level the evidence suggests that teaching a module or unit on quantum phenomena can change, at the level of the group, the way in which students think about quantum phenomena. However, only a minority of the significant changes can be traced back to statements in the syllabus. [...] This study shows that some students cannot be considered to have an interpretation of quantum theory which even attempts to approximate to a non-classical interpretation of the formalized theory" (Ireson 2000).

## II. Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zur Quantenmechanik – Ergebnisse einer empirischen Untersuchung

Im Zusammenhang mit der Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Unterrichtskonzepts wurden in den Jahren 1996–98 Untersuchungen zu Vorstellungen von Lehramtsstudenten und -studentinnen durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen die Vorstellungen der Studierenden zu Atomen, zur Unbestimmtheitsrelation und insbesondere zur Frage nach der permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten. Die Frage, ob man Elektronen zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort zuschreiben darf spielt im Münchener Unterrichtskonzept eine zentrale Rolle. Deshalb sind die Vor-

stellungen der zukünftigen Lehrerinnen und Lehrer in diesem Bereich von großem Interesse.

Die befragten Studentinnen und Studenten wurden dabei zu Interviews von 1/2 - 1 Stunde Dauer gebeten. Die Interviews wurden auf Tonband aufgezeichnet und zur Auswertung transkribiert. Insgesamt wurden 37 Lehramtsstudentinnen und -studenten (Gymnasium, 5. - 11. Semester) befragt. 52% von ihnen hatten Quantenphysik-Unterricht in der Schule; 79% hatten eine Vorlesung in theoretischer Quantenmechanik besucht. Die Antworten der Studierenden wurden in Kategorien eingeordnet. Im Folgenden sind zu den einzelnen Antwortkategorien jeweils beispielhafte Zitate wiedergegeben.

- **Atomvorstellungen**

Hier lautete die Frage: *Welche Vorstellungen verbinden Sie mit den Zuständen der Elektronen in einem Atom?* Die folgenden Antwortkategorien ergaben sich:

1. *"Orbitale" mit Wahrscheinlichkeitsverteilung (38%)*

Die meistgenannte Einzelvorstellung war das Orbitalmodell, wobei aus den Aussagen nicht immer klar erkennbar war, ob die Studierenden tatsächlich echte quantenmechanische Vorstellungen mit diesem Modell verbanden. Ein Beispiel für eine typische Aussage ist die folgende Äußerung:

S29: ...das quantenmechanische Teilchenmodell, das sind Teilchen, die haben einen Wellencharakter. Dann sind es eben Wellenfunktionen, die diese Teilchen darstellen, da gibt es die Orbitaltheorie, da kann man diese Orbitale räumlich darstellen, dann weiß man, wo sich die Elektronen ungefähr aufhalten, und das Ganze funktioniert dann mit der Wahrscheinlichkeitsdeutung.

2. *Planetenmodell oder Bohrsches Atommodell (17%)*

In dieser Vorstellungskategorie herrschte eine mechanistische Vorstellung vom Atom vor: Elektronen kreisen auf bestimmten Bahnen um den Atomkern. Die Bohrschen Postulate bzw. die Quantisierung der Energie werden nur teilweise erwähnt.

S31: Das sind Kreise ... um den Atomkern... Also Bahnen halt. Kreise sind das. Und die Elektronen sind dann auf verschiedenen Elektronenbahnen drauf. Die laufen und können auch von einer Bahn auf die andere springen, wenn sie mehr Energie erhalten, dann können sie auf eine höhere Stufe springen.

3. *Bohrsches Atommodell mit "aufgesetzter" Wahrscheinlichkeitsinterpretation. (24%)*

Hier handelt es sich um eine "Mischvorstellung" aus dem mechanistischem Bild vom Atom und der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Bei den Studierenden koexistieren verschiedene, physikalisch inkonsistente Vorstellungen. Das Planetenmodell wird leicht aktiviert, hat aber einen geringen Status gegenüber dem quantenmechanischen Modell (vgl. die entsprechenden Befunde bei Petri (1996)).

S18: Bevor man die Quantenmechanik-Vorlesung gehört hat, ist man ja irgendwie diesem Schalenmodell. Das wird einem versucht ein bisschen auszutreiben, ...dass das nicht so auf Bahnen läuft, sondern so Flächen im Atom beschreibt. ... Die Bahnen, ... dieses Bild habe ich eigentlich schon noch, wenn ich an ein Atom denke, also es wird einem schon gesagt, dass es nicht so ist, aber man steckt da schon so drin, und es wird dann auch immer wieder benutzt.

#### 4. konkrete Vorstellung von "Wolken" / verschmierte Ladungswolke (14%)

In diese Kategorie gehören relativ konkrete Vorstellungen von "Ladungsolken" oder "verschmierten Elektronen".

S3: Also am besten gar nicht mehr vorstellen (lacht) oder konkret einfach verschmiert vorstellen, dass das so ... wie eine Ladungsdichte. Also eine Ladungsdichte vom Elektron, also eine Ladungsdichte kennen wir aus der Elektrodynamik oder Elektrostatik, dass man eben in bestimmten Punkten Ladungen hat, wie Elektronen und da jetzt das Elektron noch mal als Ladungsdichte angesehen ... So sollte man sich das am besten vorstellen.

F: Was ist denn mit der Ladung, ist die jetzt nicht mehr an einem Punkt, oder wie ist das?

S3: Ja die ist jetzt außenrum in der Sphäre, also meinerwegen bei einer bestimmten Bahn, bei einem bestimmten Anregungszustand, dort also gleichmäßig verteilt. Sollte man sich am besten so vorstellen.

Die beiden dominanten Vorstellungen sind die beiden Varianten des Bohrschen Modells (zusammen 41%) und die Orbitalvorstellung (38%). Bemerkenswert ist, dass das Bohrsche Atommodell so gut wie immer als Ausgangspunkt der Argumentation benutzt wird. Quantenmechanische Modifikationen werden darauf mehr oder weniger stark "aufgesetzt". Die vor allem in der Schule erworbene Vorstellung vom Atom, um das in diskreten Bahnen die Elektronen kreisen, scheint sehr stabil zu sein.

Wenn das Bohrsche Atommodell schon so stark verankert ist, dass es von quantenmechanischen Vorstellungen nicht mehr vollständig verdrängt werden kann, stellt sich die folgende Frage: Gelingt den Studentinnen und Studenten ein reflektierter Umgang mit den verschiedenen Modellen in ihren jeweiligen Anwendungsbereichen?

##### 1. Reflektierter Umgang mit verschiedenen Modellen (55%)

S3: Also da gibt's eben das Problem zwischen Anschauung und Wirklichkeit, und die Wirklichkeit kann man halt nur immer in einem bestimmten Bereich, also durch ein Modell, veranschaulichen, ... Ein Modell veranschaulicht nicht alle Seiten, es ist nur je nachdem was man haben will, was man veranschaulichen will, da braucht man halt verschiedene Modelle, und einmal mit dem Verschmierten, ein anderes Mal doch wieder als Punkt, aber eben den man nicht genau messen kann.

##### 2. Keine klare Trennung zwischen den verschiedenen Modellen (17%)

##### 3. Nur ein Modell genannt (28%)

- **Permanente Lokalisierung**

Hier lautete die Frage: *Hat ein Elektron zu jedem Zeitpunkt einen festen Ort (den man evtl. nicht kennt)?* Die folgenden Antwortkategorien ergaben sich:



### 1. Permanente Lokalisierung (zusammen 28%)

#### (a) Elektron besitzt festen Ort, der aber unbekannt ist (21%)

Typische Aussagen zu dieser Kategorie sind die folgenden:

S2: Ich würde sagen, eigentlich hat es schon einen bestimmten Ort, nur den kennen wir halt nicht, so stell' ich mir das halt vor.

S1: Also den Zustand von den jeweiligen Schalelektronen kann man halt nicht genau bestimmen.

F: Den Zustand?

S1: Äh, den Ort.

F: Hat das Elektron zu jedem Zeitpunkt dann einen bestimmten Ort? Und man weiß ihn vielleicht nur nicht?

S1: Ja, es muss sich ja irgendwo aufhalten, aber durch die Messung ist er nicht zugänglich, der Ort.

F: Es hat irgendeinen Ort, aber man kann das nicht messen, und deshalb haben wir diese Vorstellung von Wolken? Oder wie ist das?

S1: Ja, man macht's ja über die Wahrscheinlichkeit von irgendwelchen Aufenthaltsorten und dann nimmt man wahrscheinlich an, dass halt das jeweils die Schalen sind.

#### (b) Ort ist festlegbar, aber wegen mangelnder Kenntnis der Anfangsbedingungen keine Bahn (7%)

Diese Unterkategorie unterscheidet sich von der vorangehenden darin, dass den Elektronen zwar ein bestimmter Ort zugestanden wird. Man kann aber keine Angabe über eine Bahn machen, da die entsprechenden Anfangsbedingungen unbekannt sind.

### 2. Keine Festlegung auf feste Ortseigenschaft (zusammen 54%)

#### (a) Nur Wahrscheinlichkeitsaussage möglich (18%)

Die Studierenden in dieser Unterkategorie berufen sich auf die quantenmechanische Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Ein Beispiel ist:

S32: So genau kann man es bestimmt nicht lokalisieren, man kann es nur mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten bestimmen. Wo sich dieses Elektron befindet. Es nicht so, dass man sagen kann, es ist an einem bestimmten Ort, sondern es erfüllt eben nur eine Unschärferelation zwischen Ort und Impuls, oder Energie und Zeit.

#### (b) Keine Ortseigenschaft wegen Unbestimmtheitsrelation (18%)

Eine Anzahl der Studierenden nennt die Unbestimmtheitsrelation als Ursache für die Unmöglichkeit, den Elektronen einen bestimmten Ort zuzuordnen:

S28: Einen genau bestimmten Ort kann man einem Elektron nie zuordnen wegen der Unschärferelation. Ich kann nur einen Raumbereich angeben mit dem dazugehörigen Impulsbereich. Das Produkt ergibt dann größer gleich. Einen konkreten Ort kann ich ihm nicht zugeben, ansonsten, wo genau es sich aufhält zu jedem Zeitpunkt, weiß ich auch nicht.



*(c) Lokalisierung in einem Bereich mit einer Wahrscheinlichkeit (7%)*

Ein Beispiel für diese Unterkategorie ist die folgende Aussage:

S8: Das ist einfach so, dass die keinen festen Ort meines Erachtens besitzen, sondern einfach sich willkürlich irgendwo in einem bestimmten Bereich aufhalten.

*(d) Elektron als "Verteilung" (7%)*

S13: Ich denk, das kann man gar nicht sagen, dass das Elektron jetzt tatsächlich einen Ort hat. Wenn es tatsächlich einen Ort hätte, dann könnte man den ja beschreiben. Das ist halt delokalisiert, das existiert dann halt mehr als Energieverteilung, denke ich mir.

*(e) Ort wird erst durch die Messung erzwungen (4%)*

Ein kleiner Anteil der Studierenden äußert die Meinung, dass dem Messprozess eine entscheidende Rolle zukommt, wenn man vom Ort des Elektrons sprechen will:

S29: Ich glaube, ein Ort kommt erst auf, wenn man es dann misst. Das kommt durch die Messung zustande, dass es einen Ort besitzt. Ich muss es praktisch erzwingen, dass ich einen Messvorgang mache, dann kann ich es an dem Ort registrieren.

*3. indifferent (keine Aussage, Wechsel der Auffassung...) (18%)*

Auffällig ist bei dieser Frage, dass ein häufiger Bezug auf eine "schnelle Bewegung" erfolgt, wegen der eine Lokalisierung in der Praxis nicht möglich ist:

Diese Elektronen ... schwirren halt mit einer praktisch unendlichen Geschwindigkeit, ... und wenn man lange genug misst, dann kriegt man halt diese Wahrscheinlichkeitsverteilung raus.

- **Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation**

Die Fragestellung zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation lautete:

Was bedeuten  $\Delta x$  und  $\Delta p$  in der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation?

*1. Messungenaugigkeiten (zusammen 36%)**(a) Störungsvorstellung (21%)*

Nach dieser Vorstellung beeinflusst eine Messung den Wert der komplementären Größe: Beispielweise beeinflusst eine Ortsmessung den Impuls des Teilchens. Die Vorstellung impliziert, dass beiden Werten gleichzeitig ein fester Wert zukommt (sonst gäbe es nichts, was gestört werden kann).

S13: Wenn ich den Ort sehr genau messe, verändere ich einfach den Impuls.

*(b) Gekoppelte Messungenaugigkeiten (15%)*

Die Messungenaugigkeit  $\Delta x$  gibt nach dieser Vorstellung die Genauigkeit  $\Delta p$  der Impulsmessung vor.

S15: Nehmen wir einmal an, wir kennen den Fehler von  $\Delta x$ . ... Dann kann man daraus den Mindestfehler bestimmen, den man beim Impuls gemacht hat.

## 2. "Aufenthaltsbereiche" (18%)

Unter Aufenthaltsbereichen wird z. B. der Ortsbereich, in dem das Teilchen eingesperrt ist oder die Breite der Wellenfunktion verstanden.

S34: Die Deltas sind die Bandbreite, in der man den Ort bestimmen kann und den Impuls. Wenn ich versuche ein ganz genauen Ort zu messen, dann wird diese Impulsbandbreite ziemlich groß, und ich werde immer nur ein Ergebnis in dieser Bandbreite kriegen. Wenn ich das Elektron sehr eng in ein Potential einsperre, dann sind die Impulsschwankungen von diesem Elektron hier innerhalb, das Elektron kann jeden Impuls in dieser Bandbreite annehmen. Und umgekehrt natürlich auch, wenn ich den Impuls genau festlege, kann ich nicht genau vorhersagen, wo das ist, aber ich kann zumindest einen Rahmen angeben, wo das aller Wahrscheinlichkeit nach sich aufhält.

## 3. Intervall, in dem der exakte Wert mit gewisser Wahrscheinlichkeit liegt (18%)

Auch hier wird angenommen, dass den jeweiligen Variablen ein fester Wert zukommt.  $\Delta x$  und  $\Delta p$  geben dann die Bereiche an, in denen dieser "wahre" Wert liegt.

S18: Das sind sozusagen die Wahrscheinlichkeiten der Impulse an diesem Ort. Das ist meine genaueste Aussage über den Impuls. Ich kann nur sagen, der Impuls liegt im Bereich  $p \pm \Delta p/2$ . Er liegt in diesem Intervall.

## 4. Standardabweichung einer statistischen Verteilung (13%)

Dieser Vorstellung liegt die statistische Interpretation der Quantenmechanik zu Grunde. Nach ihr handelt es sich bei  $\Delta x$  und  $\Delta p$  um die Standardabweichungen von Verteilungen von Messwerten, die an jeweils identisch präparierten Ensembles von Quantenobjekten vorgenommen wurden.

S21: Ich denke, [...] dass wenn ich so ein Experiment mehrmals durchführe und ich messe dann jeweils Ort und Impuls, dann eben nicht immer das gleiche rauskriege, das heißt wenn ich gleiche Anfangsbedingungen habe, kriege ich nicht immer das gleiche  $x$  und das gleiche  $p$  raus, sondern es schwankt einfach, und wenn ich es grafisch darstelle, dann kriege ich eine Standardabweichung raus.

## 5. Noch nie von der Unbestimmtheitsrelation gehört (3%)

Einer der Studierenden (7. Semester) gab an, noch nie etwas von der Unbestimmtheitsrelation gehört zu haben.

### • Doppelspalt-Experiment

Bei dieser Frage wurde die Anordnung des Doppelspalt-Experiments gezeigt und mitgeteilt, dass sich auf dem Schirm ein Interferenzmuster ergibt, wenn man Elektronen auf den Doppelspalt schießt. Dann wurde den Studentinnen und Studenten das folgende Gedankenexperiment zur Beurteilung vorgelegt:

Man nimmt an, dass ein Elektron entweder nur durch den linken oder durch den rechten Spalt geht. Dann müsste man das Experiment doch auch so durchführen können, dass man zuerst den linken Spalt abdeckt und alle Elektronen, die durch den rechten Spalt gehen, durchlässt. Nun deckt man den rechten Spalt ab und lässt diejenigen Elektronen durch, die durch den linken Spalt gehen. Experimentell ergibt sich bei diesem Vorgehen aber ein anderes Muster auf dem Schirm.

Auf die Frage, wo in diesem Experiment der gedankliche Fehler liegt, ergaben sich die folgenden Kategorien:

1. *Bezug auf Wellenvorstellung / "naiver" Welle-Teilchen-Dualismus (42%)*

In dieser Kategorie berufen sich die Studierenden auf die Vorstellung vom Elektron als Welle bzw. auf einen "naiven", unreflektierten Dualismus zwischen Welle und Teilchen.

S29: Das kann man sich nur erklären, wenn man das als Welle sieht. Weil wenn ich das Teilchen sehe, dann kann ich nicht verstehen, dass das Teilchen, das hier durchgeht, etwas von dem da drüben weiß. Das hat einen festen Ort, einen festen Impuls, es kann nichts wissen davon.

2. *Interferierende Wahrscheinlichkeitsamplituden (4%)*

Dieser Antwortkategorie liegt die korrekte quantenmechanische Beschreibung des Gedankenexperiments zu Grunde.

S28: Wenn ich beide offen habe dann interferieren die miteinander. Das Amplitudenquadrat gibt dann, ähnlich wie die Intensität beim Licht, so eine Kurve, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit beschreibt. Wenn ich einen zumache, dann ist die zugehörige Wellenfunktion hinten nur durch einen Spalt bestimmt.

3. *Messung verändert das Experiment (4%)*

Diese Antwort deutet in die Richtung der Bohrschen Auffassung der Quantenmechanik. Inwieweit sich die Studierenden dieser Interpretation bewusst sind, geht aus den Antworten nicht mit genügender Deutlichkeit hervor.

4. *Kann ich nicht erklären (21%)*

5. *Physikalisch unbefriedigende Erklärungsversuche (13%)*

6. *Noch nie gehört (13%)*

Zählt man die Prozentzahlen der drei letzten Kategorien zusammen, ergibt sich, dass 47% der Studentinnen und Studenten keinen adäquaten Erklärungsansatz zum Doppelspalt-Experiment anbieten können.

- **Schrödingers Katze**

Hier wurde gefragt, ob die Studierenden schon einmal etwas von Schrödingers Katze gehört haben und ob sie wiedergeben können, worum es dabei geht.

1. *Schon einmal gehört, weiß aber nicht, was es ist (62%)*
2. *Schon einmal gehört, kann den Grundgedanken erklären (31%)*
3. *Nein, noch nie gehört (8%)*

- **EPR-Paradoxon**

Die Studierenden sollten angeben, ob sie schon einmal von quantenmechanischer Nichtlokalität, vom EPR-Paradoxon oder von der Bellschen Ungleichung gehört haben.

1. *Schon einmal gehört, weiß aber nicht, was es ist (13%)*
2. *Schon einmal gehört, und kann den Grundgedanken erklären (13%)*
3. *Nein, noch nie gehört (75%)*

Bemerkenswert ist, dass über 90% der Befragten schon einmal den Ausdruck "Schrödingers Katze" gehört oder sich damit auseinandergesetzt hat. Ein großer Teil bezog sich dabei auf Tageszeitungen oder populärwissenschaftliche Literatur. Bei der Frage der quantenmechanischen Nichtlokalität kehrt sich das Verhältnis dagegen um. Der größte Teil der befragten Studentinnen und Studenten hatte davon noch nie gehört.