Physik im Kontext –
Ein Programm zur Förderung
der naturwissenschaftlichen Grundbildung
durch Physikunterricht

piko
Physik im Kontext

IPN

Gefördert durch das
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

und die Länder

# Qualitative Quantenphysik

## Eine Handreichung für die Sekundarstufe I

Rainer Müller

Handreichung für die Unterrichtsentwicklung

Der Autor dieser Handreichung ist Prof. Dr. Rainer Müller,
TU Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften,
Pockelsstraße 11, 38106 Braunschweig.

*Physik im Kontext* wird gefördert durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und die Länder.

Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) in Kiel koordiniert das Programm *Physik im Kontext* und kooperiert mit der Humboldt-Universität Berlin, der Universität Paderborn, der Universität Kassel und der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg.

Projektleiter: Prof. Dr. Manfred Euler
Kontakt: Dr. Christoph Thomas Müller, cmueller@ipn.uni-kiel.de
Sekretariat: Marianne Müller, pikosek@ipn.uni-kiel.de, Tel. 0431 880 4539
Internet: www.physik-im-kontext.de

Postadresse:
Physik im Kontext
Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften
(IPN) an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel

# Inhaltsverzeichnis


**1 Bildungsziele in der Sekundarstufe I** **6**
- 1.1 Übergeordnete Bildungsziele . . . 6
- 1.2 Bildungsziele, die sich aus der Sachstruktur der Quantenphysik ergeben 7
- 1.3 Quantenphysik in der Sekundarstufe I . . . 10
- 1.4 Traditionelle Vorgehensweise im Unterricht . . . 11
- 1.5 Atomarer Aufbau der Materie – Atommodelle in Physik- und Chemieunterricht . . . 13

**2 Wesenszüge der Quantenmechanik** **15**
- 2.1 Die Wesenszüge nach Küblbeck und Müller . . . 15
- 2.2 Wesenszug 1: Statistisches Verhalten . . . 17
- 2.3 Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz . . . 21
- 2.4 Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse . . . 26
- 2.5 Wesenszug 4: Komplementarität . . . 27

**3 Weitere quantenmechanische Effekte** **29**
- 3.1 Fotoeffekt . . . 29
- 3.2 Energiequantisierung in Atomen . . . 30
- 3.3 Welle-Teilchen-Dualismus . . . 31
- 3.4 Unbestimmtheit . . . 31
- 3.5 Tunneleffekt . . . 34
- 3.6 Einzelne Atome in Atomfallen . . . 35
- 3.7 Schrödingers Katze . . . 37

**4 Fachliche Voraussetzungen für Quantenphysik-Unterricht in der Sekundarstufe I** **40**

**5 Lernumgebungen: Das Simulationsprogramm zum quantenmechanischen Doppelspaltversuch** **44**

**6 Realexperimente zur Interferenz einzelner Quantenobjekte** **49**
- 6.1 Mit „einfachen“ Mitteln realisierbare Versuche . . . 49
- 6.2 Doppelspaltexperiment mit Elektronen . . . 49
- 6.3 Einzelne Elektronen im Doppelspaltexperiment . . . 50
- 6.4 Neutroneninterferenz . . . 52
- 6.5 Doppelspaltexperimente mit Helium-Atomen . . . 52
- 6.6 Beugungsexperiment mit $C_{60}$-Molekülen . . . 53

**7 Interpretationen der Quantenphysik** **54**
- 7.1 Interpretation der Quantenmechanik als Unterrichtsinhalt? . . . 54
- 7.2 Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik . . . 54
- 7.3 Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik . . . 55

**8 Schülervorstellungen zur Quantenphysik** **61**
8.1 Die Untersuchung von Bethge . . . . . 61
8.2 Die Untersuchungen von Wiesner . . . . . 64
8.3 Die Untersuchung von Lichtfeldt und Fischler . . . . . 69

**9 Literatur** **72**

# Vorwort

Die vorliegende Handreichung soll einen Überblick über die Möglichkeiten geben, Inhalte aus der Quantenphysik in der Sekundarstufe I zu unterrichten. Die Quantenphysik ist ein gut etabliertes Oberstufenthema, eines der schwierigsten und inhaltlich komplexesten Themen der Schulphysik. Warum sollte man auf den Gedanken kommen, einen solchen Stoff in der Sekundarstufe I unterrichten zu wollen?

Die Stimmen, die in letzter Zeit immer stärker nach einem möglichst frühen Quantenphysik-Unterricht laut werden, berufen sich auf die Tatsache, dass ein Großteil der Schülerinnen und Schüler Physik zum frühest möglichen Zeitpunkt abwählt. Damit wird ihnen die Chance genommen, sich in der Schule mit einem der wichtigsten Bestandteile des physikalischen Weltbildes auseinanderzusetzen. Wenn wir aber in der Schule Allgemeinbildung vermitteln wollen, gehören Aspekte der Quantenpyhsik sicherlich zu dem Teil, den die Physik dazu beisteuern kann. Auf welche Weise dies inhaltlich geschehen kann, wird in Abschnitt I dieser Handreichung diskutiert.

Abschnitt 2 ist das Herzstück der Handreichung. Hier werden „Wesenszüge der Quantenphysik“ identifiziert und qualitativ formuliert. Es geht um das begrifflich Zentrale der Quantenphysik, das in möglichst prägnanter Form herausgearbeitet werden soll. Dass es sich dabei in der Sekundarstufe I um qualitative Aussagen handeln muss, versteht sich von selbst. Es werden vier Wesenszüge vorgestellt und mit Beispielen erläutert.

Die Wesenszüge umfassen nicht unbedingt den „Standardstoff“ der Sekundarstufe II, wie etwa Fotoeffekt oder die Energiequantisierung in Atomen. Sie sind in gewisser Weise fundamentaler als die traditionellen Unterrichtsinhalte, denn sie sind ja gerade aus dem Bemühen entstanden, nur die „weltbild-relevanten“ Aspekte der Quantenphysik zu isolieren. Ob und wie die herkömmlichen Inhalte in einen wesenszugorientierten Unterricht eingebettet werden können, wird in Abschnitt 3 diskutiert.

Nachdem Abschnitt 4 die stofflichen Voraussetzungen für den Quantenphysik-Unterricht in der Sekundarstufe I klärt, stellt Abschnitt 5 ein wichtiges Medium zur Vermittlung der Wesenszüge vor: Ein Simulationsprogramm zum Doppelspaltexperiment (das frei verfügbar ist).

Auf quantenmechanische Experimente wird in Abschnitt 6 eingegangen. Die meisten Experimente sind nicht einfach zu realisieren, und oftmals ist man auf die Diskussion der Literatur angewiesen. Einige der wichtigsten Experimente werden in Abschnitt 6 beschrieben.

Die Interpretation der Quantenmechanik ist so umstritten wie bei keinem anderen physikalischen Teilgebiet. Einen Überblick über die wichtigsten Positionen gibt Abschnitt 7. Schließlich widmet sich Abschnitt 8 relativ ausführlich dem wichtigen Thema der Schülervorstellungen zur Quantenmechanik. Dass Schülervorstellungen bei allen Lernprozessen eine große Rolle spielen und beim Unterrichten berücksichtigt werden sollten, ist inzwischen Allgemeingut. Gerade weil es sich bei der Quantenphysik die Gefahr unphysikalischer Vorstellungen besonders groß ist, sollten Schülervorstellungen bei der Unterrichtsplanung von Anfang an im Auge behalten werden.

# 1 Bildungsziele in der Sekundarstufe I

## 1.1 Übergeordnete Bildungsziele

Die Quantenphysik ist sicherlich der begrifflich komplexeste Inhalt der gesamten in der Schule behandelten Physik. Obwohl sie empirisch glänzend bestätigt ist, wird ihre Interpretation bis heute intensiv debattiert. Bei der Erarbeitung eines Unterrichtskonzepts zur Quantenphysik steht man daher vor nicht geringen Problemen. Mehr als in anderen Gebieten hat man Entscheidungen über die Schwerpunkte des Unterrichts und die Art und den Umfang der unumgänglichen Kompromisse zu treffen.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass die in der fachdidaktischen Literatur diskutierten Unterrichtskonzepte sich teilweise stark voneinander unterscheiden. Jeder Ansatz stellt eine andere Antwort auf die Frage dar, womit die Quantenphysik zur physikalischen Bildung beitragen kann und welche Bedeutung ihr für die einzelnen Schülerinnen und Schüler zukommt. Eine endgültige und „richtige“ Antwort gibt es hier noch weniger als in anderen Gebieten.

Die derzeitige Diskussion um schulische Inhalte wird sehr stark von Bildungsstandards und dem damit einhergehenden Kompetenzbegriff geprägt. Schülerinnen und Schüler sollen nicht so sehr Inhalte als Kompetenzen erwerben. Beispielhaft sollen hier die Leitgedanken aus den Bildungsstandards Baden-Württemberg (Klasse 10) betrachtet werden. Die bis zum Ende der Sekundarstufen I zu erwerbenden Kompetenzen werden dort folgendermaßen klassifiziert:

1. Physik als Naturbetrachtung unter bestimmten Aspekten
2. Physik als theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft
3. Formalisierung und Mathematisierung in der Physik
4. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik
5. Anwendungsbezug und gesellschaftliche Relevanz der Physik
6. Physik als ein historisch-dynamischer Prozess
7. Wahrnehmung und Messung
8. Grundlegende physikalische Größen
9. Strukturen und Analogien
10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen
11. Struktur der Materie
12. Technische Entwicklungen und ihre Folgen
13. Modellvorstellungen und Weltbilder

Wie kann Quantenphysik eingeordnet werden? Neben 11 gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Unterricht anzulegen, so dass verschiedene Aspekte betont werden, beispielsweise 1 oder 3 oder 9. Wenn man von diesen übergeordneten Bildungszielen ausgeht, fällt schon relativ früh eine Entscheidung, welche der in der Literatur vorgeschlagenen Unterrichtsansätze zu verfolgen sind: „Weltbild"-Ansatz, Historischer Ansatz, Atomphysik-Ansatz.

## 1.2 Bildungsziele, die sich aus der Sachstruktur der Quantenphysik ergeben

Es liegen eine ganze Reihe von Unterrichtsvorschlägen zur Quantenphysik vor (fast ausschließlich entworfen für die Sekundarstufe II). Man kann sie nach den Zielen, die sie verfolgen, in unterschiedliche Klassen einteilen:

1. *Konzentration auf die Prinzipien des quantenmechanischen Formalismus*
   Diese Kategorie entspricht am ehesten dem Punkt 3 aus der obigen Klasssifikation der Bildungsziele. Hier sind in der Quantenphysik zum einen Unterrichtskonzepte zu nennen, die sich mit dem Feynmanschen Zeigerformalismus auseinandersetzen, der mit dem Buch „QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie" (Feynman 1988) populär geworden ist. Der Zeigerformalismus kommt in den Unterrichtskonzepten von Bader (1994, 1996), Küblbeck (1997) und Erb/Schön (Erb 1995, Schön & Werner 1998) zum Einsatz. Er ist eine Variante des Pfadintegral-Zugangs zur Quantenmechanik und hat den Vorteil, ohne jegliche Näherung in der Schule anwendbar zu sein (was allerdings mit einer Vernachlässigung der Anwendungen erkauft wird, z. B. bei gebundenen Systemen und Atomen).

   Zum anderen sind unter dieser Kategorie Zugänge zu nennen, die großes Gewicht auf die formalen Prinzipien der Quantenmechanik legen, z. B. die Konzeption von Brachner und Fichtner (Brachner & Fichtner 1977, 1980, Fichtner 1980). Hier wird – in Anlehnung an die "Feynman Lectures" (1966) – stark mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude gearbeitet. Für die Sekundarstufe I dürften diese Ansätze nicht in Frage kommen. Ein Prinzip, das bei diesem Zugang im Vordergrund steht, ist das „quantenmechanische Fundamentalprinzip", das angibt, wann man Wahrscheinlichkeitsamplituden zu addieren hat und wann Wahrscheinlichkeiten. Auch Unterrichtsansätze, die sich wie das Berliner Konzept (Berg et al. 1989) um eine „Minimalkonzeption" bemühen, sind hier einzuordnen, ebenso wie Ansätze, die sich an einer Elementarisierung des üblichen Formalismus (Schrödingergleichung, Operatoren, Eigenwertgleichungen) versuchen.

2. *Beschäftigung mit den begrifflichen Fragen der Quantenphysik*
   Unter dieser Kategorie sind Zugänge einzuordnen, die sich hauptsächlich mit den Interpretationsfragen der Quantenphysik beschäftigen. In den Bildungsstandards oben entspricht dies z. B. dem Punkt 13. Man kann zwei Schwerpunk-

te unterscheiden: Einerseits kann man fragen, durch was die Quantenmechanik sich am stärksten von der klassischen Physik unterscheidet: Energiequantisierung, Unbestimmtheit, Überlagerungszustände, Nichtlokalität? Ziel dieser Schwerpunktsetzung ist es, die Sichtweise der Quantenmechanik möglichst deutlich von der der klassischen Physik abzugrenzen. Es soll gezeigt werden, dass die Quantenmechanik eine fundamental andere Theorie als die klassische Mechanik ist und sich nicht mit einigen Zusatzannahmen aus dieser ergibt.

Dreyer (http://www.educeth.ch/physik/leitprog/quanten/) hat in dieser Richtung ein „Leitprogramm“ entworfen, in dem sich die Schülerinnen und Schüler selbständig die Unterschiede zwischen klassischer und Quantenphysik erarbeiten.

Man kann auch die eigentlichen Interpretationsfragen der Quantenmechanik betonen: Was bedeutet die Unbestimmtheitsrelation? Was passiert bei einer Messung und wie kann man sie beschreiben? Diese Probleme, über die sich auch die Fachleute keineswegs einig sind, ergeben sich aus dem Versuch der Lernenden ein in sich widerspruchsfreies Bild der quantenmechanischen Naturbeschreibung aufzubauen.

Bei beiden Schwerpunktsetzungen steht die Frage nach der „Bedeutung“ der Quantenmechanik im Vordergrund. Hintergrund ist hierbei die Feststellung, dass die Quantenmechanik (zusammen mit der Relativitätstheorie) das Weltbild der modernen Physik von Grund auf verändert hat. Die Quantenmechanik wird als eine kulturelle Errungenschaft angesehen, die einem möglichst breiten Kreis der Gesellschaft vermittelt werden soll. Ein solcher Blickwinkel wird vor allem im Münchener Unterrichtskonzept (Müller & Wiesner 2000, 2002; Müller 2003) eingenommen, das sich in einen qualitativen Basiskurs und einen quantitativen Aufbaukurs gliedert. Im Basiskurs wird versucht, die weltbildprägenden Aspekte der Quantenmechanik möglichst pointiert herauszuarbeiten. Dazu wurden Simulationsprogramme entwickelt (Mach-Zehnder-Interferometer und Doppelspaltexperiment), mit denen die eigenartigen Phänomene der Quantenmechanik erkundet werden können. Das Münchener Unterrichtskonzept wurde in einer umfangreichen Website dokumentiert („milq“: www.cip.physik.uni-muenchen.de/∼milq/).

Von Küblbeck wurden die zugrundeliegenden Ideen dieses Konzepts aufgenommen und weiterentwicklt (Küblbeck & Müller 2002). Küblbeck identifizierte vier „Wesenszüge der Quantenphysik“, die weiter unten ausführlicher vorgestellt werden sollen. Da die qualitativen, eher begrifflich und nichtmathematisch agierenden Anteile in diesen Konzeptionen einen großen Raum einnehmen, gibt es gute Chancen, diese beiden Konzeptionen in die Sekundarstufe I zu übertragen.

3. *Historischer Zugang*
   In den obigen Bildungsstandards entspricht dieser Zugang Punkt 6. Hier wird eine geistesgeschichtliche Perspektive gewählt. In seiner Zielsetzung braucht

sich dieser Zugang nicht sehr stark von dem vorher genannten zu unterscheiden. Beim historischen Zugang wird der Wandel der physikalischen Ideen in seiner historischen Entwicklung verfolgt. Es wird gezeigt, auf welche Weise sich die heutige Sichtweise der Dinge ergeben hat. Die Physik wird dabei „personifiziert“; Schülerinnen und Schüler können sich mit den Protagonisten identifizieren. Instruktive Irrtümer und Irrwege können dabei diskutiert werden.

Dieser Weg bietet sich vor allem an, wenn die historische Entwicklung relativ geradlinig verlaufen ist, so dass sie von den Schülerinnen und Schülern ohne große Verwirrung nachvollzogen werden kann. Zu den bereits genannten Zielen tritt die Einbettung der erarbeiteten Ideen in ihren geschichtlichen Zusammenhang und die Bekanntheit mit den herausragenden Figuren der Physikgeschichte. Ein Vertreter des historischen Zugangs ist Kuhn (1991, 1992, 1994, 2000, 2001). Auch hier sind qualitative Anteile relativ umfangreich, so dass eine Übertragung in die Sekundarstufe I möglich erscheint.

4. *Quantenmechanik als Basis für das Verständnis anderer physikalischer Theorien*
   Hier wird die Quantenmechanik als Basistheorie für andere Teilgebiete der Physik aufgefasst, z. B. für die Atomphysik, die Festkörperphysik oder die Kern- und Elementarteilchenphysik. Meistens steht dabei die Atomphysik im Vordergrund, entweder aus historischen Gründen oder wegen der in diesem Bereich in der Schule eingeführten Experimente.

   Zu dieser Kategorie zählt etwa das Unterrichtskonzept von Niedderer und Mitarbeitern (Niedderer 1992, Deylitz 1999). Hier wird die Schrödinger-Gleichung über eine Analogie zu stehenden Wellen in inhomogenen Medien plausibel gemacht. Der Schwerpunkt liegt dann in der Atomphysik: Das Wasserstoff-Atom und höhere Atome werden mit einem grafischen Modellbildungssystem numerisch behandelt. Ob ein solcher Ansatz in der Sekundarstufe I eine Chance auf Erfolg haben kann, hängt entscheidend davon ab, inwieweit es gelingt, die Mechanismen hinter den Computeralgorithmen für die Schülerinnen und Schüler auf qualitativem oder semiquantitativem Niveau durchschaubar zu machen.

5. *Quantenmechanik als Grundlage für zahlreiche technologische Anwendungen*
   Ausgangspunkt für diese Akzentsetzung ist die Tatsache, dass sehr viele heutige technologische Produkte ohne die Quantenmechanik nicht zu verstehen sind. Als Beispiele seien nur der Laser, der Transistor und die Leuchtdiode genannt. Dabei können die technischen Anwendungen entweder als illustrierende Beispiele dienen, die Sachstruktur jedoch der Quantenmechanik folgen. Die andere Möglichkeit ist, die technologischen Anwendungen in den Mittelpunkt zu stellen und die Quantenmechanik nur als Basis für deren Verständnis zu betrachten. Die Unterrichtsziele liegen dann in der Hinführung zum Verständnis der Anwendungen.

   In diesem Zugang rückt der Gedanke der Kontexteinbettung der Inhalte in den Vordergrund. Ausgearbeitete Zugänge dieser Art liegen jedoch fast ausschließlich auf Hochschulniveau vor (z. B. Singh 1997, 1999).

Das „Visual Quantum Mechanics“-Konzept von Zollman (1998, 1999) – eines der wenigen ausgearbeiteten Quantenmechanik-Unterrichtskonzepte aus dem englischsprachigen Raum, das sich auf dem Niveau der Sekundarstufe II bewegt – enthält Beispiele für Inhalte aus dieser Kategorie. Mit Simulationsprogrammen werden hier z. B. die Spektren von LEDs untersucht und auf die Bandstruktur in Festkörpern zurückgeführt. Eine Anpassung für die Sekundarstufe I erscheint schwierig, jedoch nicht ausgeschlossen.

Sehr attraktiv ist auch der Gedanke, das moderne Thema der Quanteninformation als Basis für die Beschäftigung der Quantenmechanik zu wählen. Quantenkryptographische Verfahren sind bereits in das Stadium der technischen Realisierung getreten, und die Idee eines Quantencomputers treibt einen ganzen Zweig der modernen Forschung an. Zum Thema Quanteninformation gibt es einen Unterrichtsvorschlag aus Oldenburg (www.physik.uni-oldenburg.de/qubit/index.htm), der sich an Leistungskurse der Jahrgangsstufe 13 richtet.

Die grundlegende quanteninformationstheoretische Größe, das Qubit, erschließt sich der Anschauung recht schnell. Will man allerdings reale Fragestellungen behandeln (z. B. Shor-Algorithmus zum schnellen Faktorisieren großer Zahlen), wird das Thema schnell sehr komplex und nur noch auf der Basis sehr komplizierter Berechnungen verständlich. In jedem Fall wird man zu einem elementaren Verständnis der Grundlagen der Quanteninformation den Begriff des quantenmechanischen Überlagerungszustandes benötigen, den man anschaulich am besten am Beispiel des Doppelspaltexperiments gewinnen kann. Von daher scheint sich die Quanteninformation eher für eine Vertiefung als für einen Einstieg in die Quantenmechanik zu eignen.

Interessant ist auch der Zugang zur Quanteninformation über die „wechselwirkungsfreie Quantenmessung“ (auch als „Bombenexperiment“ bekannt). Es exisiteren einige Vorschläge, wie man einen solchen Zugang in der Schule realisieren könnte (s. www.ap.univie.ac.at/users/fe/MERLIN_MPI/konzept.htm oder www.quantenphysik-schule.de/knaller.htm)

## 1.3 Quantenphysik in der Sekundarstufe I

Ganz allgemein darf man sich nicht der Illusion hingeben, die Quantenphysik sei einfach. Das gilt auch, wenn man sich dafür entscheidet, sie in der Sekundarstufe I zu unterrichten. Die Quantenmechanik ist von unserer Alltagsanschauung so weit entfernt, und weist so „seltsame“ Züge auf, dass immer höchste kognitive Anstrengungen von Seiten der Lernenden nötig sein werden.

Wenn man meint, eine „einfache“ Elementarisierung der Quantenpyhsik gefunden zu haben, ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass diese Elementarisierung physikalisch so unangemessen ist, dass es unredlich den Schülerinnen und Schüler gegenüber wäre, die Quantenphysik in dieser Form zu unterrichten. Besser gar keine

Quantenphysik in der Sekundarstufe I als eine Version „ad usum delphini“, die man als pyhsikalisch nicht haltbar bezeichnen muss.

Es gibt bisher kaum Versuche, die Quantenpyhsik für die Sekundarstufe I zu elementarisieren. Es ist relativ klar, dass ein solcher Zugang weitgehend qualitativ erfolgen muss. Von den vorstehend vorgestellten Ansätzen weist das Münchener Unterrichtskonzept bzw. der verwandte Ansatz von Küblbeck und Müller qualitativ formulierte Anteile auf, in denen die Grundzüge der Quantenmechanik mit Hilfe von Simulationsprogrammen und Gedankenexperimenten illustriert werden. Die „Wesenszüge der Quantenmechanik“ nach Küblbeck und Müller sollen deshalb im Folgenden ausführlicher dargestellt werden. Aber auch für diesen qualitativ orientierten Zugang gilt, dass er große kognitive Anstrengungen auf Seiten der Lernenden voraussetzt.

## 1.4 Traditionelle Vorgehensweise im Unterricht

Etwa seit 1945 nimmt die Quantenphysik einen größeren Raum im Curriculum des Gymnasiums ein. Seit dieser Zeit hat sich für den Unterricht in der Oberstufe eine bestimmte traditionelle Vorgehensweise etabliert, die sich aus einer Wechselbeziehung zwischen Unterrichtspraxis, Lehrplänen und Schulbüchern herausgebildet hat. Den inhaltlichen Verlauf dieses typischen Unterrichtsgangs kann man wie folgt wiedergeben:

1. *Photoeffekt und Photonen*
   Die traditionelle Vorgehensweise beginnt mit dem Phänomen des Photoeffekts. Man gelangt auf induktive Weise zum Photonenbegriff: Die Abhängigkeit der Energie der ausgelösten Elektronen von der Frequenz des einfallenden Lichtes und seiner Intensität wird mit der Gegenspannungs-Methode experimentell untersucht. Man erhält so die Einsteinsche Gleichung mit der zunächst noch nicht interpretierten Proportionalitätskonstante $h$ zwischen Photonenfrequenz und Elektronenenergie. Daraufhin wird der Begriff des Photons eingeführt, zusammen mit der Aussage, dass „die Abgabe von Energie aus Licht [...] in quantisierter Form“ erfolgt (Quantenhypothese).

2. *Röntgenstrahlen und Compton-Effekt*
   Röntgenstrahlung wird oftmals schon in der Unterrichtseinheit zu elektromagnetischen Wellen eingeführt. In der Quantenphysik kann man die Grenzfrequenz der Bremsstrahlung als Beleg für die Quantenhypothese werten. Führt man den Impuls eines Photons ein, lässt sich mit Energie- und Impulssatz der Compton-Effekt theoretisch erklären.

3. *Wahrscheinlichkeiten und Welle-Teilchen-Problematik; Unbestimmtheitsrelation*
   Als erster Einstieg in die Deutungsfragen der Quantenphysik wird in einem Experiment der Doppelspalt-Versuch mit abgeschwächtem Laserlicht untersucht

und festgestellt, dass der verwendete Fotofilm Schwärzungen in einem stochastischen Muster aufweist. Dies führt zur Formulierung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation: „In der Quantenphysik sind Einzelprozesse stochastisch verteilt. Ihre Wahrscheinlichkeitsdichte unterliegt aber streng determinierten Gesetzen; man erkennt diese Gesetze, wenn hinreichend viele Einzelprozesse stattgefunden haben“. Im Vergleich zu den entsprechenden Modellen der klassischen Physik wird nun anhand des Doppelspalt-Beugungsmusters diskutiert, dass es sich bei Photonen weder um klassische Teilchen noch um klassische Wellen handeln kann (Welle-Teilchen-Problematik).

Die Unbestimmtheitsrelation kann man anhand des allmählichen Verschwindens von Interferenzerscheinungen nach dem Einschalten einer Quecksilberdampflampe (Druckverbreiterung) einführen. Eine Vertiefung oder Deutung findet an dieser Stelle noch nicht statt. Abschließend wird der Übergang von niedrigen zu hohen Photonenzahlen, also zur makroskopischen Physik der klassischen elektromagnetischen Welle diskutiert.

4. *Elektronenbeugung*
   Nach der Quantenphysik des Lichtes geht man nun zur Quantenphysik der Elektronen über. Die de-Broglie-Wellenlänge von Elektronen wird theoretisch postuliert. Anschließend wird diese Vermutung im Experiment (Elektronenbeugungsröhre) bestätigt.

   Die Überlegungen zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation werden nun auf Elektronen übertragen (Filmschwärzung durch einen $\beta$-Strahler) und die Schrödingersche Analogie zwischen geometrischer Optik und klassischer Mechanik angesprochen.

5. *Unbestimmtheitsrelation und Deutungsfragen*
   Wie im Fall der Photonen lässt sich auch das Verhalten von Elektronen weder in einem reinen Teilchen- noch einem reinen Wellenmodell erfassen. Die de-Broglie-Wellen werden als Wahrscheinlichkeitswellen aufgefasst. Eine weitere Aussage über die Interpretation der Quantenmechanik wird am Beispiel des Feynman-Mikroskops am Doppelspalt erarbeitet: „Messungen an Elektronen ändern im Allgemeinen die Wahrscheinlichkeitswelle: Verschärfungen der Ortsmessungen vergrößern die Unschärfen des Impulses“. Die Unbestimmtheitsrelation wird anschließend am Einzelspalt erarbeitet und an Beispielen erläutert.

   Schließlich werden an dieser Stelle weitere Deutungsfragen angesprochen: Die Objektivierbarkeit physikalischer Größen in der klassischen und der Quantenphysik, die Frage, was in diesem Zusammenhang das Wort „unbestimmt“ bedeutet sowie das Problem der Festlegung des quantenphysikalischen Zustands und seiner Änderung durch Messungen. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet eine Diskussion der Begriffe Kausalität und Determinismus im Zusammenhang mit der Quantenphysik.

## 1.5 Atomarer Aufbau der Materie – Atommodelle in Physik- und Chemieunterricht

Die Quantenmechanik hat sich aus dem Bemühen entwickelt, die Physik der Atome zu verstehen, speziell die Entstehung der Spektrallinien und die damit verbundene Quantisierung der Anregungsenergien. Dass die Materie atomar zusammengesetzt ist, gehört sicherlich zu den wichtigsten Erkenntnissen der Naturwissenschaften.

### 1.5.1 Atommodelle im Chemieunterricht

Die Aufgabe, ein Bild vom mikroskopischen Aufbau der Materie zu vermitteln, übernimmt in der Sekundarstufe I jedoch nicht die Physik, sondern die Chemie (für eine Übersicht s. z. B. Pietzner 2005). Meist schon recht früh wird etwa das Dalton-Modell eingeführt, in dem die Atome als Kugelteilchen behandelt werden. Damit kann man Lösungsvorgänge beschreiben und eine Einführung in die chemischen Reaktionen geben. Um das Thema chemische Reaktionen und den Aufbau der Atome (Periodensystem) eingehender zu behandeln, wird ein weiterführendes Atommodell benötigt. Dies wird im Allgemeinen das Rutherfordsche oder das Bohrsche Atommodell sein, die im Chemieunterricht oft auch als Kern-Hülle-Modell bzw. Schalenmodell bezeichnet werden.

Bedenkt man, dass zu den genannten abstrakten Atommodellen meist noch veranschaulichende Modelle wie das Kalottenmodell kommen, kann man ermessen, mit welch einer Fülle von Modellvorstellungen die Schülerinnen und Schüler allein schon im Chemieunterricht konfrontiert werden. Dass sie dabei Einsicht in den Modellcharakter der im Unterricht behandelten Vorstellungen gewinnen und den reflektierten Umgang mit den Modellen lernen, kann man nur hoffen.

Im Physikunterricht der Sekundarstufe I wird der Aufbau der Materie an einigen wenigen Stellen ebenfalls thematisiert. Elektronen (als Bestandteile der Atome) leiten etwa den Strom in einem Draht; Gase bestehen aus Atomen und Molekülen in Bewegung. Inwieweit es wünschenswert ist, dass der Physikunterricht das Thema „Atome und ihr Aufbau“ in der Sekundarstufe I noch einmal aus der Perspektive der Physik beleuchtet oder ob die eingehende Behandlung des Themas der Chemie überlassen bleiben soll, kann nicht pauschal beantwortet werden. Typische Schülervorstellungen, die in der Physik beim Thema „Teilchen und Atome“ auftreten, sind von Fischler und Lichtfeldt (2004) und Duit (2004) zusammengestellt worden.

### 1.5.2 Die Debatte um das Bohrsche Atommodell

Das Bohrsche Atommodell ist im Physikunterricht der Oberstufe als einführendes Modell beliebt. Seine Behandlung im Unterricht ist jedoch in den letzten Jahren zunehmend auf Kritik gestoßen. Modernere Unterrichtsansätze versuchen, ein quantenmechanisch haltbares Bild vom Atom zu vermitteln.

Zwar war das 1913 von Bohr postulierte Modell ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg zum heutigen Verständnis der Atome, insbesondere ihrer Spektrallinien. Es

gibt die Lage der Spektrallinien aber keineswegs für alle Atome richtig wieder, sondern nur für Wasserstoff und die wasserstoffähnlichen Alkalimetalle. Selbst für Helium mit nur zwei Elektronen gelang es trotz intensiver Bemühungen nicht, stationäre Elektronenbahnen zu finden, die das beobachtete Spektrum liefern. Für Atome mit mehr Elektronen ist die Situation noch hoffnungsloser. Das Bohrsche Atommodell beschreibt die beobachteten Phänomene also nicht vollständig.

Aus didaktischen Gründen erscheint das ausführlichere Eingehen auf das Bohrsche Atommodell ebenfalls fragwürdig, denn es gibt ganz zentrale Aussagen der Quantenmechanik nicht adäquat wieder. Beispielsweise besitzen Elektron im Bohrschen Modell (im Gegensatz zur quantenmechanischen Vorstellung) einen festen Ort; sie laufen auf festen Bahnen um den Atomkern. Wenn ein Ziel des Unterrichts das Vermitteln einer quantenmechanisch korrekten Vorstellung vom Atom mit Wahrscheinlichkeitsvorstellungen („Orbitalen“) ist, dann sind quasiklassische Modelle für den Lernprozess eher hinderlich. Die Gefahr ist groß, dass das Bohrsche Modell bei den Schülerinnen und Schülern zu unerwünschten klassischen Atomvorstellungen führt.

Sauer (1992) hat sich ausführlich mit dem didaktischen Für und Wider des Bohrschen Atommodells auseinandergesetzt. Er kommt zu dem Schluss, „dass die didaktische Leistungsfähigkeit des Bohrschen Atommodells, sofern dieses als Planetenmodell aus dem Jahr 1913 verstanden wird, kaum größer als der wissenschaftliche Wert des Modells einzuschätzen ist. Auf der anderen Seite ist man heute von einer schulgemäßen Elementarisierung noch so weit entfernt, dass das Bedürfnis nach einer „Atomtheorie ohne Quantenmechanik“ verständlich ist. Diese negative Motivation scheint die einzig überzeugende Begründung für alle quasiklassischen Atomtheorien im Unterricht zu sein.“

Das soll jedoch nicht bedeuten, dass man das Bohrsche Atommodell im Atomphyik-Unterricht ganz „verschweigen“ sollte. Untersuchungen über Schülervorstellungen (s. u.) ergeben regelmäßig, dass die Vorstellung von kreisenden Elektronen in Befragungen über Atomvorstellungen immer wieder spontan genannt wird. Das Bohrsche Modell ist in den Schülerköpfen also bereits vor dem Unterricht präsent. Die Ursache dafür liegt sicherlich teilweise im Chemieunterricht, teilweise in den zahlreichen Bohrschen Atomdarstellungen in Zeitschriften und Fernsehen. Eine Erfolg versprechende Unterrichtsstrategie liegt am ehesten in der kritischen Auseinandersetzung mit dem Bohrschen Atommodell auf der Basis einer im Unterricht erarbeiteten korrekten quantenmechanischen Atomvorstellung.

# 2 Wesenszüge der Quantenmechanik

## 2.1 Die Wesenszüge nach Küblbeck und Müller

In ihrem gleichnamigen Buch haben Küblbeck und Müller (2002) versucht, die „Wesenszüge der Quantenphysik“ aus der vielfältigen Palette quantenmechanischer Begriffe, Phänomene und Effekte herauszudestillieren. Ziel war eine Reduktion der möglichen Lehrinhalte auf diejenigen Aspekte, die die Quantenphysik grundsätzlich von der klassischen Physik unterscheidet. Damit stehen die begrifflichen Fragen der Quantenmechanik im Vordergrund. Küblbeck und Müller möchten stärker als im traditionellen Unterricht herausstellen, dass die Quantenphysik nicht einfach ein weiterer Zweig der Physik ist, wie ihn die Schülerinnen bisher in Mechanik, Optik, Elektrizitäts- und Wärmelehre kennengelernt haben. Die Quantenphysik vermittelt ein ganz neues physikalisches Weltbild. Die Absicht bei der Entwicklung dieses Ansatzes war es, den Schülerinnen und Schülern einen ersten Einblick in den Charakter dieses quantenmechanischen Weltbildes zu geben.

Mit dem Ansatz der Konzentration auf vier charakteristische Wesenszüge „wird eine Gewichtung vorgenommen, aus der sich wenige klare Zielvorgaben für den Unterricht ableiten lassen. Dies scheint ein entscheidendes, um nicht zu sagen wesentliches Qualitätsmerkmal. [...] Für die Umsetzung im Unterricht wird es [...] in jedem Fall erforderlich sein, wenige klare Zielvorgaben konsequent umzusetzen, um einen nachhaltigen Lernerfolg zu sichern“ (H. Schwarze).

Die Formulierung der Quantenphysik durch Wesenszüge weicht von dem traditionellen Unterrichtsgang sowohl inhaltlich als auch der Zielsetzung nach ab. Die Gewichtung liegt weniger auf den traditionellen Experimenten, die sich für eine mathematische Beschreibung auf Schulniveau eignen. Diese werden durch qualitative Simulationsexperimente (Doppelspaltexperiment) ersetzt, die ein direktes Erforschen der als zentral angesehenen Aspekte der Quantenphysik erlauben. Entsprechend führen Küblbeck und Müller die vier Wesenszüge qualitativ ein, ohne zunächst eine mathematische Beschreibung folgen zu lassen. Das macht den Zugang für die Sekundarstufe I interessant, in der eine mathematische Vertiefung kein Ziel sein kann.

Die folgenden vier Wesenszüge werden als charakteristisch für die Quantenmechanik angesehen:

- Wesenszug 1: Statistisches Verhalten
- Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz
- Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse
- Wesenszug 4: Komplementarität

Im Folgenden werden die Wesenszüge etwas ausführlicher beschrieben und dargestellt, wie man sie anhand von Modellexperimenten einführen kann.

Seit Feynman ist akzeptiert, dass das Doppelspaltexperiment besonders zur Verdeutlichung von quantenmechanischen Sachverhalten geeignet ist. Deshalb werden

die Wesenszüge anhand des Doppelspaltexperiments verdeutlicht. Quantenobjekte werden auf eine Blende mit zwei Schlitzen geschossen und die sich ergebende Verteilung der durchgelassenen Objekte wird auf einem Schirm registriert. Das Schema eines solchen Experiments ist in Abb. 1 dargestellt.

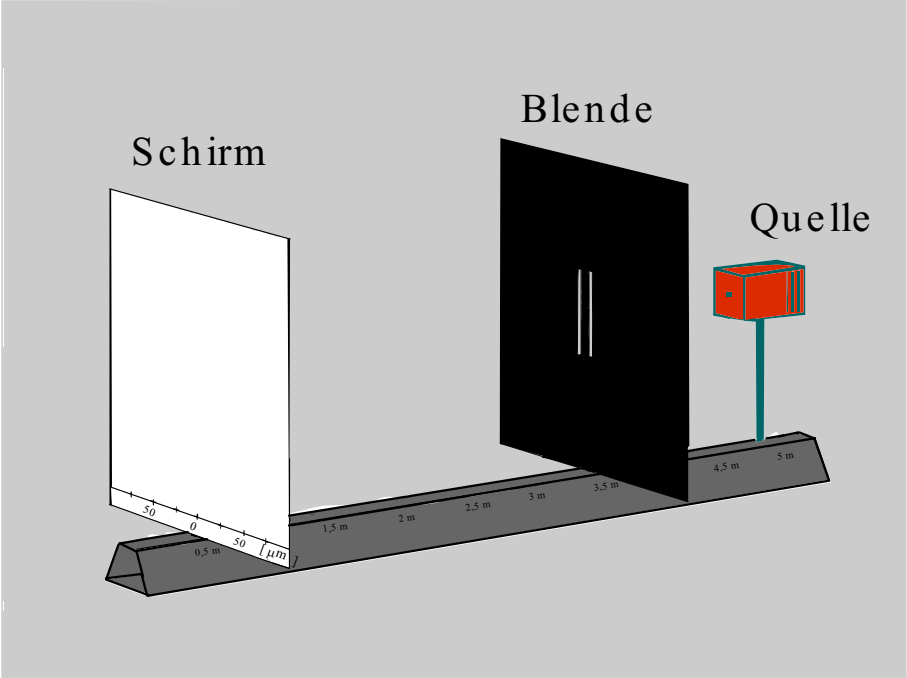


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Doppelspalt-Experiments

Abbildung 2: Bei der Beugung von Helium-Atomen verwendeter Doppelspalt

Man kann das Doppelspaltexperiment mit Photonen oder Elektronen behandeln. Man kann auch von einem 1991 an der Universität Konstanz durchgeführten Realexperiment ausgehen, in dem Helium-Atome auf einen Doppelspalt geschossen wurden. Die Herstellung zweier ausreichend kleiner Spalte gelang mit Techniken aus der Halbleiterherstellung. Aus einer dünnen Goldfolie wurde einen Doppelspalt mit zwei 1 $\mu$m breiten Spalten im Abstand von 8 $\mu$m gefertigt (Abb. 2). In dem Experiment wurden die Heliumatome vor dem Doppelspalt durch Elektronenstoß in einen

angeregten Zustand gebracht. Dahinter trafen sie auf eine Goldfolie, die als Detektorschirm diente. Sie gaben dort ihre Anregungsenergie ab und wurden elektronisch registriert. Abb. 3 zeigt, wie sich nach und nach das Interferenzmuster aus den „Flecken“ einzeln nachgewiesener Heliumatome aufbaut. Das Experiment erstreckte sich über einen Zeitraum von 42 Stunden, so dass trotz der großen Zahl der insgesamt nachgewiesenen Atome jedes Atom einzeln registriert werden konnte.

Ganz ähnliche Experimente wurden mit Elektronen, Neutronen oder sogar ganzen $C_{60}$-Molekülen durchgeführt. Wenn man sich die entsprechenden Quantenobjekte als Teilchen vorstellt, hat das Ergebnis des Experiments mehrere überraschende Eigenschaften.

1. Der Ort, an dem ein einzelnes Quantenobjekt nachgewiesen wird, ist nicht vorhersagbar.

2. Dennoch erscheint ein regelmäßiges Muster, und zwar um so deutlicher, je mehr Spuren von nachgewiesenen Quantenobjekten gesammelt wurden.

3. Dieses Muster sieht ganz anders aus, als man es bei wahllos auftreffenden Teilchen erwarten würde. Wäre da nicht die Körnigkeit des Musters, könnte man vom Interferenzmuster einer Welle sprechen.

Mit diesen Feststellungen, die bisher rein qualitativ waren, kann man die Wesenszüge der Quantenmechanik einführen.

## 2.2 Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

### 2.2.1 Formulierung des Wesenszugs

Wir denken uns das Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Elektronen durchgeführt. Das Experiment wird zu einem beliebigen Zeitpunkt gestoppt, und man versucht, den Nachweisort des nächsten Elektrons vorherzusagen. Eine solche Vorhersage wäre jedoch reine Glückssache.

Die Verteilung, die sich nach vielen Wiederholungen des Experiments ergibt, ist – innerhalb von stochastischen Schwankungen – reproduzierbar. Deshalb könnte man die Chance für einen Treffer etwas erhöhen, wenn man in einen der Bereiche geht, an dem besonders häufig Elektronen ankommen.

Offensichtlich kann man eine Aussage darüber machen, wie *wahrscheinlich* die Elektronen in den verschiedenen Bereichen nachgewiesen werden. Für Elektronen gelten stochastische Gesetzmäßigkeiten.

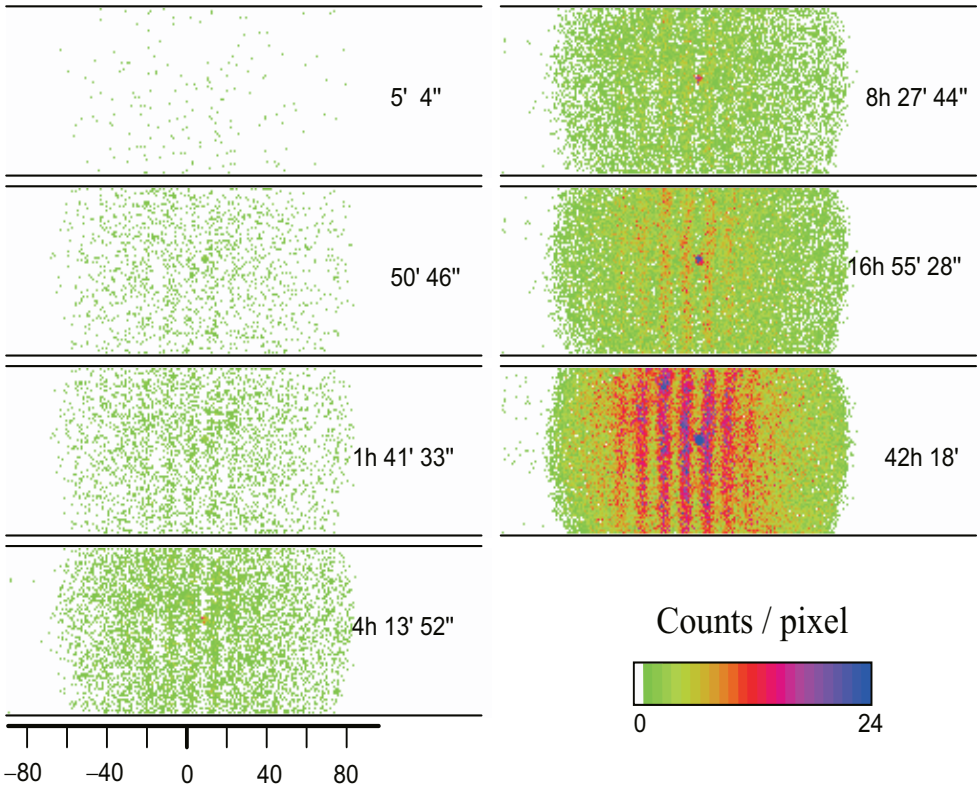


Abbildung 3: Aufbau des Interferenzmusters aus einzeln nachgewiesenen Heliumatomen (experimentelle Originaldaten)

**Wesenszug 1: Statistisches Verhalten:**

**a) In der Quantenphysik können Einzelereignisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden.**

**b) Bei vielen Wiederholungen ergibt sich jedoch eine Verteilung, die – bis auf stochastische Schwankungen – reproduzierbar ist.**

Auch in der klassischen Physik gibt es häufig Vorgänge, deren Ausgang scheinbar durch den Zufall bestimmt ist. Ein Beispiel ist der Würfelwurf. Wenn man dabei allerdings die Versuchsbedingungen einschließlich der Anfangsbedingungen genau genug kennen würde, also auch Luftbewegungen, Unebenheiten der Unterlage usw., dann könnte man mit Newtons Gesetzen im Prinzip die gewürfelte Zahl genau vorhersagen. Der „zufällige“ Ausgang des Würfelwurfs ist also vom Newtonschen Standpunkt prinzipiell determiniert.

Die Beschränkung auf Wahrscheinlichkeitsaussagen teilt die Quantenmechanik auch mit der klassischen statistischen Mechanik. Im Quantenbereich ist das statistische Element jedoch von grundlegenderer Natur als dort und beim Würfelwurf.

Während es in der statistischen Mechanik die Unkenntnis des Experimentators über die genauen Koordinaten und Geschwindigkeiten der Gasteilchen ist, die den Übergang zu Wahrscheinlichkeitsaussagen erzwingt, *gibt es* in der Quantenmechanik eine solche tiefere Beschreibungsebene gar nicht.

Wenn wir den Nachweisort eines Elektrons nicht vorhersagen können, handelt es sich nicht um subjektive Unkenntnis der Anfangsbedingungen, sondern um eine prinzipielle Grenze. Nach der Quantenmechanik gibt es *kein* Merkmal und keine zusätzlichen Parameter, an denen sich vorher ablesen ließe, wo ein bestimmtes Elektron auf dem Schirm landet. Es ist keine „vollständigere" Kontrolle der Elektronen möglich. Auch wenn man alles Wissbare über den Anfangszustand eines Elektrons weiß, ist es unmöglich, seinen Nachweisort vorherzusagen. Es ist auch nicht möglich, ein Elektron so zu präparieren, dass es an einer vorher bestimmten Stelle auf dem Schirm landet.

Mit der Unmöglichkeit, genaue Vorhersagen über Einzelereignisse zu treffen, ist eine Abkehr vom Determinismus der klassischen Physik verbunden. Die Kenntnis der Anfangsbedingungen zu einem Zeitpunkt reicht nicht mehr aus, um die Position und die Geschwindigkeit aller Objekte zu jedem späteren Zeitpunkt vorhersagen zu können (wegen der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist es noch nicht einmal möglich, diese Information überhaupt zu erlangen bzw. einen solchen Zustand zu präparieren).

**Während in der klassischen Mechanik der Ausgang von Experimenten grundsätzlich determiniert ist, ist bei quantenphysikalischen Ereignissen der Ausgang prinzipiell vom Zufall bestimmt.**

Bedeutet dieses Ergebnis, dass mit der Quantenmechanik die wissenschaftliche Vorhersagbarkeit, die einen der Grundpfeiler der Physik darstellt, zu Grabe getragen werden muss? Obwohl es auf den ersten Blick so scheinen mag, ist dies doch nicht der Fall. Die Physik beschäftigt sich nicht mit einzelnen Ereignissen, sondern immer nur mit reproduzierbaren (d. h. wiederholbaren) Phänomenen. Die Quantenmechanik legt nun nicht das Resultat einzelner Experimente fest (z. B. den Ort eines einzelnen Elektrons), sondern beschreibt eine ganze Serie von Experimenten, indem sie die relativen Häufigkeiten der einzelnen Messergebnisse vorhersagt.

Diese statistischen Aussagen sind *reproduzierbar*: Jedesmal wenn die gleiche Serie von Experimenten durchgeführt wird, ergibt sich *dieselbe* Verteilung der relativen Häufigkeiten. Ganz zentral in diesem Zusammenhang ist die Erkenntnis, dass statistische Gesetzmäßigkeiten eben auch strenge Gesetzmäßigkeiten sind. Auch wenn die Quantenmechanik keine Aussagen über Einzelereignisse machen kann, macht sie doch streng gültige Vorhersagen über viele Ereignisse, an denen sich die Theorie überprüfen lässt. Die Quantenmechanik legt nicht das Resultat von Einzelereignissen fest (z. B. den Ort, an dem ein einzelnes Elektron gefunden wird), sondern sie beschreibt eine ganze Serie von Experimenten mit identisch präparierten Quantenobjekten, für die sie die Häufigkeitsverteilungen der Messwerte vorhersagt. Diese

Vorhersagen sind reproduzierbar: Jedes Mal, wenn die gleiche Serie von Experimenten durchgeführt wird, ergibt sich die gleiche Verteilung von Messwerten. In diesem Sinne ist die Vorhersagbarkeit nicht aufgegeben, sondern nur auf die Ebene statistischer Gesetzmäßigkeiten verlagert worden.

Möglicherweise ist dies der Punkt, an dem sich klassische und Quantenphysik am stärksten unterscheiden. Die prinzipielle Unvorhersagbarkeit von Messergebnissen wäre damit das entscheidende Merkmal, das die klassische Physik von der Quantenphysik trennt. Entsprechend wäre der Wesenszug „Statistisches Verhalten“ derjenige, der vorrangig vor allen anderen behandelt werden müsste.

### 2.2.2 Modellexperimente zu Wesenszug 1

Wesenszug 1 lässt sich am Beispiel des Doppelspalt-Experiments verdeutlichen. Alle im Folgenden erwähnten Experimente können als Simulationsexperimente mit dem weiter unten beschriebenen Doppelspalt-Simulationsprogramm durchgeführt werden. Das Programm kann kostenlos bei der Physikdidaktik der Universität München heruntergeladen werden.

**Experiment 1.1 (Computersimulation):** Führe das folgende Simulationsexperiment durch: Wähle Elektronen mit einer Energie von 50 keV, eine Spaltbreite von 200 nm und einen Spaltabstand von 700 nm. Nach Einschalten der Quelle werden Elektronen auf dem Schirm nachgewiesen. Sie hinterlassen punktförmige „Flecke“ an scheinbar zufälligen Stellen auf dem Schirm (Abb. 4). Es bildet sich ein Muster heraus, je mehr Elektronen nachgewiesen werden (evtl. mit der Taste „Speed“ beschleunigen). Es handelt sich um das gleiche Interferenzmuster eines Doppelspaltes wie in der Optik.

Welche Vorhersagen kann man über den Ort auf dem Schirm machen, an dem ein bestimmtes Elektron nachgewiesen wird?

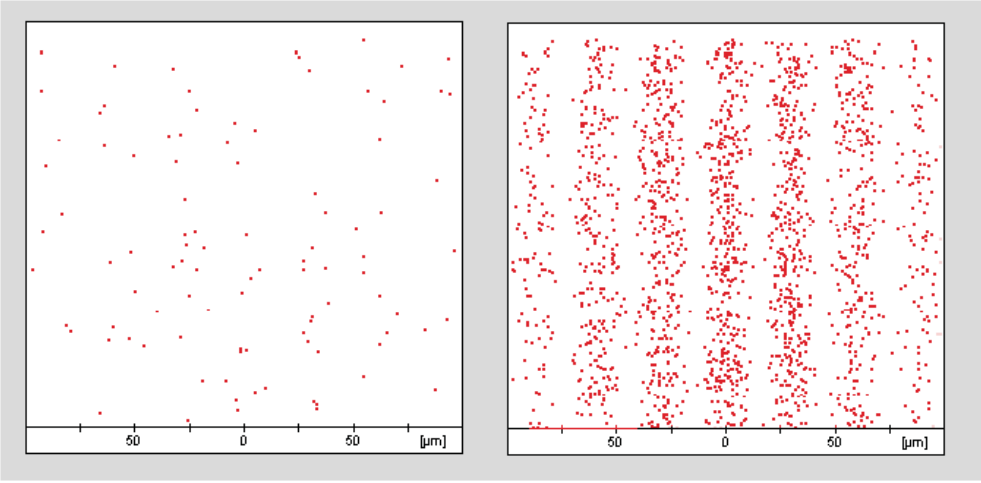


Abbildung 4: Allmählicher Aufbau des Doppelspalt-Interferenzmusters aus einzelnen „Einschlägen“

**Experiment 1.2 (Computersimulation):** Schalte nun die Quelle aus und betrachte das Muster, das die Elektronen auf dem Schirm hinterlassen haben. Nehmen wir an, du wolltest noch ein einzelnes weiteres Elektron hinzufügen. Kannst du vorhersagen, an welcher Stelle auf dem Schirm dieses Elektron nachgewiesen wird?

Wenn du den Versuch durchführst, indem du die Quelle für eine kurze Zeit einschaltest, erscheint eine neuer Fleck auf dem Schirm. Es dürfte dir nicht gelungen sein, den exakten Ort dieses neuen Flecks vorherzusagen.

**Experiment 1.3 (Computersimulation):** Die Vorhersage wird erfolgreicher, wenn man das Experiment ein wenig modifiziert. Es sollen nun 100 weitere Elektronen hinzugefügt werden. Kannst du vorhersagen, an welchen Stellen viele Elektronen landen werden und an welchen Stellen wenige?

Führe den Versuch durch. Lösche dazu das Schirmbild (auf den Schirm klicken und Reset drücken), schalte die Quelle ein und warte, bis 100 Treffer gezählt wurden. Vergleiche das Ergebnis mit deinen Vorhersagen.

Vermutlich war deine Vorhersage im letzten Experiment recht zuverlässig. Worin liegt der Unterschied zwischen den beiden Experimenten? Im zweiten Experiment haben wir die Spielregeln geändert: Wir sind von einer Aussage über ein **Einzelereignis** zu einer **Wahrscheinlichkeitsaussage** übergegangen. Tatsächlich ist es ein ganz allgemeiner Zug der Quantenmechanik, dass im Allgemeinen keine Vorhersagen über Einzelereignisse möglich sind; man ist gezwungen, zu statistischen Aussagen überzugehen.

## 2.3 Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

### 2.3.1 Formulierung des Wesenszugs

Beim Sammeln der Detektionspunkte von vielen Elektronen erhält man ein Streifenmuster. Man stellt fest, dass die Streifen nicht beobachtet werden können, wenn einer der beiden Spalte verschlossen wird.

Das sich auf dem Schirm ergebende Muster kann nicht als Schattenwurf der beiden Spalte gedeutet werden, denn es treten (je nach Spaltbreite und -abstand) mehr als zwei Streifen mit vielen Nachweisspuren auf.

Das Muster entspricht viel mehr einem Interferenzmuster, das man bei einem Doppelspaltexperiment mit einer klassischen Welle erhält. Man kann analoge Experimente mit Lichtwellen, Schallwellen oder Mikrowellen durchführen, immer erhält man eine entsprechende Intensitätsverteilung mit mehreren Maxima und Minima. Dies legt nahe, das Muster der Elektronen auf dem Schirm ebenfalls als Interferenzmuster zu deuten.

Es gibt eine große Anzahl von Quantenexperimenten, die solche Interferenzmuster zeigen (s. Abschnitt 6). Diese werden auch dann beobachtet, wenn sich stets nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Anordnung befindet. So betrug in Abb. 3 die mittlere Zeitdauer zwischen zwei Detektionen ca. drei Sekunden. Bei jedem dieser Experimente gibt es für das Eintreten eines bestimmten Versuchsergebnisses (zum Beispiel „Detektion am Schirmpunkt X“) mehrere im klassischen Teilchenbild denkbare Mög-

lichkeiten. In unserem Beispiel könnte man sich vorstellen, dass das Elektron durch den linken Spalt (Möglichkeit 1) oder durch den rechten Spalt (Möglichkeit 2) zum Schirmpunkt X gelangt. Das Ergebnis des Versuchs, der Nachweis am Schirmpunkt X, ist in beiden Fällen das gleiche.

**Wesenszug 2: "Fähigkeit zur Interferenz"**

**Auch einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen. Voraussetzung ist, dass es für das Eintreten des gleichen Versuchsergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.**

Dieser Wesenszug hat erkenntnistheoretisch folgenreiche Konsequenzen. Er enthält den oft zitierten „Welle-Teilchen-Dualismus“. Dessen naive Form („Manchmal verhalten sich Quantenobjekte wie Wellen und manchmal wie Teilchen“) wird durch die Wesenszüge 2-4 präzisiert und der scheinbar darin enthaltene Widerspruch aufgelöst. Die Quantenmechanik verliert in der Formulierung durch Wesenszüge etwas von der mythologischen Aura, mit der sie manchmal umgeben wird, und wird auf qualitativem Niveau der rationalen Diskussion zugänglich.

### 2.3.2 Modellexperimente zu Wesenszug 2

Um Elektronen und klassische Teilchen zu vergleichen, führen wir den Doppelspalt-Versuch mit Farbspray durch. Es besteht aus kleinen Tröpfchen, und wir dürfen erwarten, dass diese sich nach dem klassischen Teilchenmodell verhalten.

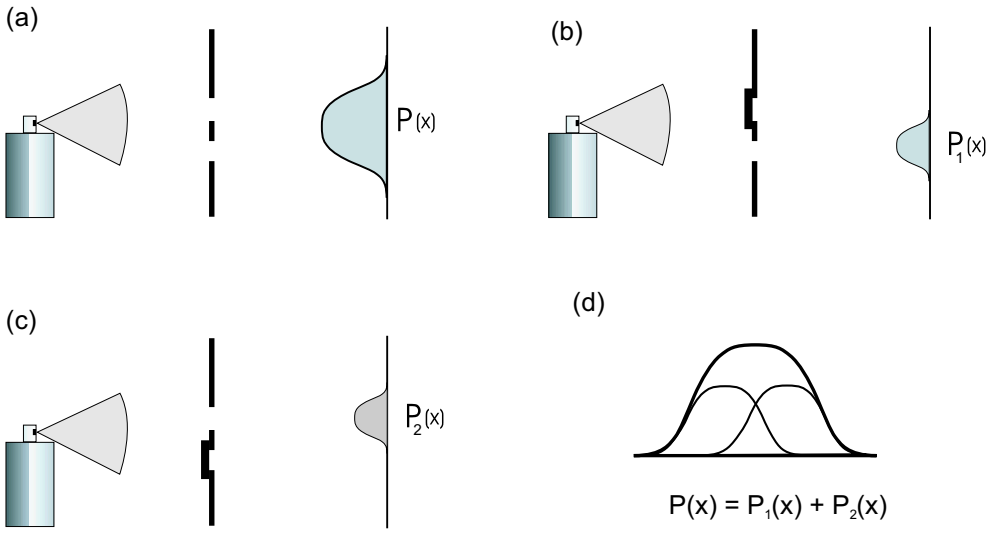


Abbildung 5: Doppelspaltversuch mit Farbtröpfchen (klassischen Teilchen)

**Experiment 2.1 (Simulation):** Stelle die Quelle im Doppelspalt-Simulationsprogram auf „Farbspray“ ein. Sprühe kleine Farbtröpfchen durch den Doppelspalt auf den Schirm. Das

Muster wird wie in Abb. 5 (a) aussehen. Die Intensität der Farbe auf dem Papier ist hinter den Spalten am größten und nimmt nach außen hin kontinuierlich ab.

Der Versuch zeigt, dass sich Elektronen und klassische Farbteilchen verschieden verhalten. Das von den Elektronen erzeugte Muster zeigte ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Linien, die nicht als geometrischer „Schatten“ des Doppelspalts gedeutet werden konnten.

Es gibt aber auf einer fundamentaleren Ebene einen weiteren Unterschied zwischen den von klassischen Teilchen und von Elektronen erzeugten Doppelspalt-Mustern. Er wird in der folgenden Versuchsserie sichtbar:

**Experiment 2.2 (Computersimulation):** In Experiment 2.1 wird Spalt 2 abgedeckt (Abb. 5 (b)), so dass nur Farbtröpfchen von Spalt 1 auf das Papier gelangen. Es ergibt sich das Muster $P_1(x)$. Danach wird der andere Spalt abgedeckt, so dass nur Farbe von Spalt 2 auf das Papier gelangt. Man erhält so das Muster $P_2(x)$ (Abb. 5 (c)).

Für das Farbspray (klassische Teilchen) ist die beim Doppelspalt gewonnene Verteilung gleich der *Summe der beiden Einzelspaltverteilungen* (Abb. 5 (d)).

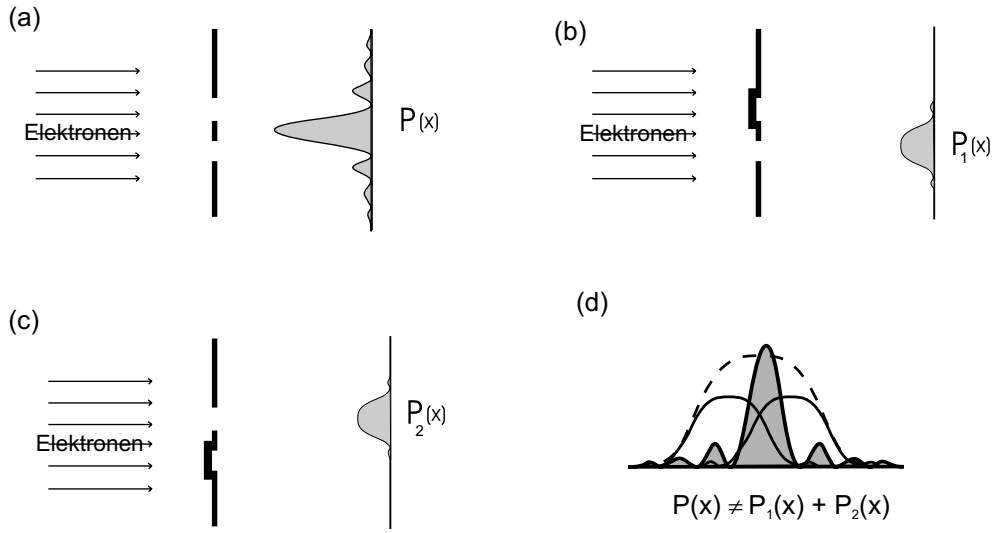


Abbildung 6: Doppelspaltversuch mit Elektronen

Ganz anders verläuft ein entsprechendes Experiment mit Elektronen.

**Experiment 2.3 (Computersimulation):** Wähle im Simulationsprogramm zum Doppelspaltversuch Elektronen. Klicke auf den Schirm und schließe Spalt 2. Nun können die Elektronen nur noch durch Spalt 1. Wenn du die Quelle einschaltest und wartest, bis sich das Schirmbild aufgebaut hat, erhältst du die Elektronenverteilung $P_1(x)$, deren Maximum hinter Spalt 1 liegt (Abb. 6 (b)).

Öffnen nun Spalt 2 wieder und schließe Spalt 1. Alle Elektronen müssen jetzt durch Spalt 2. Nach Einschalten der Quelle ergibt sich die Verteilung $P_2(x)$, deren Maximum hinter Spalt 2 liegt (Abb. 6 (c)).

Legt man die beiden Verteilungsmuster übereinander (Abb. 6 (d)), ergibt sich eine *andere* Verteilung, als bei zwei gleichzeitig geöffneten Spalten. Im Gegensatz zu klassischen Teilchen stellt es für Elektronen einen Unterschied dar, ob beide Spalte gleichzeitig offen sind oder ob einer nach dem anderen geöffnet wird.

### 2.3.3 Folgerung aus Wesenszug 2: Elektronen ohne Ortseigenschaft

Eine erkenntnistheoretisch bedeutsame Folgerung, die man unmittelbar aus dem gerade durchgeführten Simulationsexperiment ziehen kann, betrifft die für klassische Teilchen wohldefinierte Eigenschaft „Ort“. Einem Teilchen der klassischen Physik wird man jederzeit einen bestimmten Ort zuschreiben (den man vielleicht aufgrund mangelnder Information nicht kennt). Für Quantenobjekte trifft das nicht mehr unbedingt zu. Ein prominentes Beispiel dafür sind die Elektronen im Atom. Im Bohr'schen Atommodell und in der Anschauung der meisten Schülerinnen und Schüler besitzt ein Elektron zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort. In der Quantenmechanik wird den Elektronen im Atom die Eigenschaft eines bestimmten Ortes abgesprochen. Sie werden als delokalisierte Objekte aufgefasst.

Diese für unser Bild vom Atom so wichtige Erkenntnis kann man sich mit Wesenszug 2 und dem Doppelspaltexperiment plausibel machen. Folgende Argumentation (s. auch Kuhn 2000, Müller 2003) zeigt uns, dass man den Elektronen im Doppelspaltexperiment nicht ohne weiteres die Eigenschaft „Ort“ zuschreiben kann.

Wenn ein Elektron in diesem Experiment ein permanent lokalisiertes Objekt wäre, würde man das Experiment folgendermaßen beschreiben: Etwa die Hälfte der Elektronen geht durch den linken Spalt, die restlichen durch den rechten Spalt. Aufgrund der mangelnden experimentellen Auflösung läßt sich allerdings nicht angeben, durch welchen der beiden Spalte ein bestimmtes Elektron gegangen ist. Das Elektron wäre also durch genau einen der beiden Spalte zum Schirm gekommen, man weiß nur nicht, durch welchen.

Diese Darstellung trifft für klassische Teilchen (wie Steine oder Fußbälle) zu. Für Quantenobjekte wie Elektronen ist sie aber falsch. Nehmen wir an, in Wirklichkeit sei jedes Elektron durch einen bestimmten Spalt gegangen. Wenn diese Annahme stimmt, müßte das auf dem Schirm nachgewiesene Muster unverändert bleiben, wenn man die Elektronen „umsortiert“. Dazu läßt man zuerst alle diejenigen Elektronen die experimentelle Anordnung passieren, die durch den linken Spalt gehen und erst danach die durch den rechten Spalt B. Dieses „Umsortieren“ haben wir aber gerade in dem Simulationsexperiment im letzten Abschnitt vorgenommen. Das Ergebnis ist noch einmal in Abb. 7 dargestellt.

Die „links durchgegangenen“ Elektronen erzeugten das Schirmbild $P_1(x)$ auf dem Schirm (Abb. 7 (a)). Die „rechts durchgegangenen“ Elektronen führten zum Schirmbild $P_2(x)$ (Abb. 7 (b)). Beide zusammengenommen ergeben das in Abb. 7 (c) dargestellte Muster. Im Gegensatz zu unserer Vermutung beim „Umverteilen“ der Elektronen entspricht diese aber nicht dem Muster mit zwei geöffneten Spalten. Anscheinend steckt irgendwo in der Argumentationskette ein Fehler.

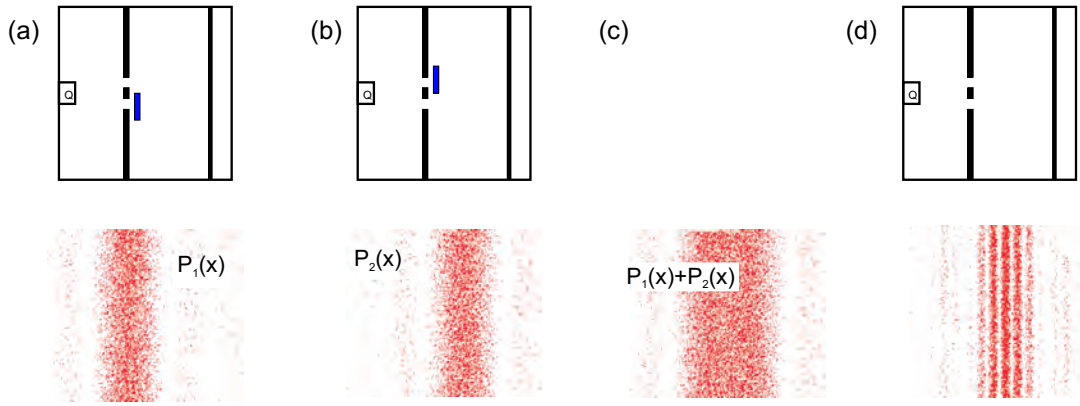


Abbildung 7: Ortseigenschaft im Doppelspaltexperiment

Der Fehler steckt in unserer Ausgangsannahme. Wir vermuteten, dass jedes Elektron durch einen bestimmten, aber unbekannten Spalt geht. Andere Möglichkeiten als „links“ oder „rechts“ schien es nicht zu geben. In Anbetracht des Versuchsergebnisses ist diese Annahme nicht mehr haltbar. Man kann einem Elektron keinen Spalt zuordnen, durch den es „in Wirklichkeit“ gegangen ist. Die Elektronen im Doppelspalt-Experiment besitzen die Eigenschaft „Ort“ nicht.

**In der Quantenmechanik ist es möglich, daß einem Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften (z. B. „Ort“) nicht zugeschrieben werden können.**

Dies ist eine grundlegende Erkenntnis, die z. B. auch auf die Elektronen im Atom übertragbar ist. Die am Beispiel des Doppelspalts gewonnene Einsicht hat also weit reichende Konsequenzen für unsere Vorstellung vom mikroskopischen Aufbau der Welt: Man spricht den Elektronen im Atom die Eigenschaft Ort nicht etwa deshalb ab, weil man ihren Ort nicht kennt („weil sie so klein und schnell sind“), sondern weil sie diese Eigenschaft nach der Quantenmechanik nicht besitzen. Diese fundamentale Erkenntnis kann man, wie hier gezeigt, mit qualitativen Mitteln gewinnen.

Man kann diese Erkenntnis in der Sprache der Wesenszüge noch allgemeiner formulieren und von der hier untersuchten speziellen Eigenschaft „Ort“ abstrahieren:

**Wenn es für ein Quantenobjekt mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, die zum gleichen Versuchsergebnis führen, dann realisiert das Quantenobjekt keine dieser Möglichkeiten. Vielmehr ist es objektiv unbestimmt, auf welche Weise das Versuchsergebnis eintritt.**

## 2.4 Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

### 2.4.1 Formulierung des Wesenszugs und Modellexperiment

Nachdem man im Zusammenhang mit Wesenszug 2 zu der Aussage gelangt ist, dass man einem Elektron im Doppelspaltexperiment die Eigenschaft „Ort“ nicht zuschreiben kann, stellt sich die folgende Frage: Den Ort des Elektrons kann man ja messen. Was passiert bei einer Ortsmessung, wenn das gemessene Elektron in einem Zustand ist, in dem man ihm die Eigenschaft Ort gar nicht zuschreiben kann? Diese Frage wirft das wichtige Thema des Messprozesses in der Quantenmechanik auf.

Eine Ortsmessung an den Elektronen im Doppelspaltexperiment kann man mit dem erwähnten Simulationsprogramm visualisieren. Der Bereich hinter den Spalten wird mit einer Lichtquelle ausgeleuchtet (Abb. 8). Das Licht der Lichtquelle trifft ein Elektron und wird von ihm gestreut. Wenn es in unser Auge gelangt, sehen wir das gestreute den Licht und haben damit eine Ortsmessung durchgeführt.

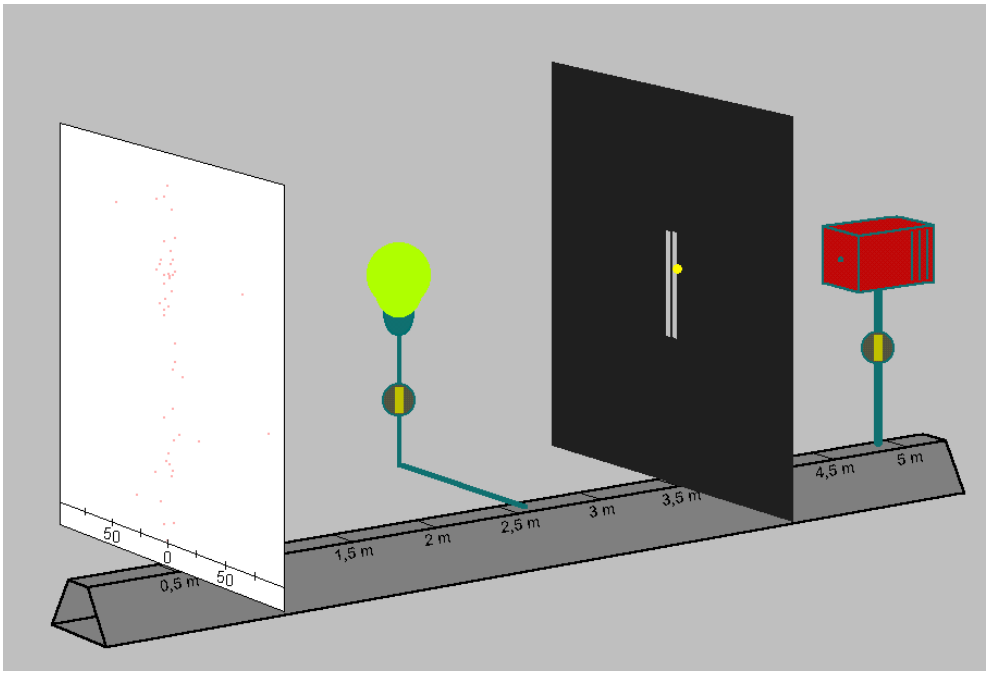


Abbildung 8: Bei jeder Ortsmessung wird ein Elektron an einem ganz bestimmten Ort gefunden.

Was ist nun das Ergebnis dieser Ortsmessungen beim Doppelspaltexperiment? Im Simulationsprogramm zeigt sich: Für jedes einzelne Elektron, das die Spalte passiert, sehen wir einen Lichtblitz an einer ganz bestimmten Stelle (Abb. 8). Das bedeutet, dass man jedes Elektron bei der Ortsmessung an einem wohldefinierten Ort findet, und zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit genau hinter einem der beiden Spalte. Die Ortsmessung hat also ein eindeutiges Ergebnis, auch wenn die Elektronen vor der Messung in einem Zustand waren, in dem sie die Eigenschaft Ort gar nicht besaßen.

Eine Messung an einem quantenmechanischen Objekt unterscheidet sich in dieser Hinsicht gravierend von Messungen in der klassischen Physik: Während in der klassischen Physik durch eine Messung eine schon vorher festliegende Eigenschaft schlicht festgestellt wird, hat eine quantenmechanische Messung aktiven Charakter. Das gemessene System wird „gezwungen“, sich für einen der möglichen Messwerte zu „entscheiden“. Hätten wir statt des Ortes des Elektrons seinen Impuls gemessen, dann hätten wir für den Impuls einen eindeutigen Messwert erhalten.

Dies ist ein genereller Zug von Messungen in der Quantenmechanik. Wenn an einem Quantenobjekt eine Messung gemacht wird, so ist das Ergebnis bezüglich der gemessenen Variablen stets eindeutig.

**Wesenszug 3: „Eindeutige Messergebnisse“**

**Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt vor der Messung in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist.**

Dies illustriert noch einmal sehr deutlich, dass in der Quantenmechanik ein wesentlicher Unterschied darin besteht, ob ein Quantenobjekt eine Eigenschaft *besitzt* oder ob man an ihm eine Eigenschaft *misst*. Wie wir gesehen haben, muss ein Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft (wie den Ort) keineswegs besitzen. Führt man eine Messung durch, findet man dagegen immer einen Messwert. Aus der Tatsache, dass sich bei einer Messung des Ortes ein bestimmter Wert ergeben hat, darf man also keineswegs schließen, dass das Quantenobjekt diese Eigenschaft vorher aufgewiesen hat.

Pascual Jordan formuliert dies so: „Beobachtungen stören nicht nur, was in einem System gemessen wird, sie erzeugen es. Bei einer Ortsmessung wird das Elektron zu einer Entscheidung gezwungen. Wir zwingen es an einen bestimmten Ort, vorher war es nicht hier, nicht dort, es hatte sich für keinen Ort entschieden.“

## 2.5 Wesenszug 4: Komplementarität

### 2.5.1 Formulierung des Wesenszugs und Modellexperiment

Auch den vierten Wesenszug kann man mit der gleichen Anordnung im Simulationsprogramm untersuchen. Bei der Ortsmessung an den Spalten haben wir jedes Elektron hinter genau einem der beiden Spalte gefunden. Wenn wir das Experiment mit vielen Elektronen wiederholen und uns anschauen, welche Verteilung sich auf dem Schirm ergibt, stellen wir fest (Abb. 9): Statt des Interferenzmusters ergibt sich diesmal eine strukturlose Verteilung (die Summe der beiden Einzelspalt-Verteilungen).

Dadurch, dass wir das Elektron gezwungen haben, sich für einen der beiden Spalte zu entscheiden, haben wir verhindert, dass ein Interferenzmuster auf dem Schirm entsteht.

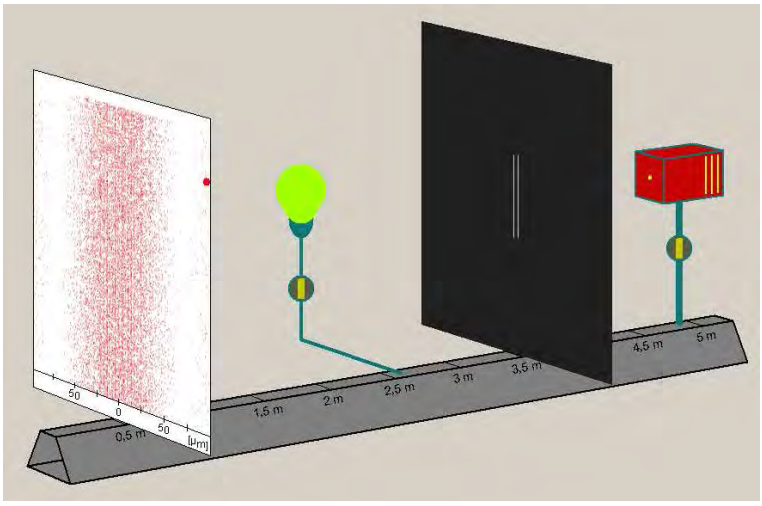


Abbildung 9: Führt man eine Ortsmessung durch, ergibt sich kein Interferenzmuster

**Ortseigenschaft und Interferenzmuster sind nicht gleichzeitig realisierbar, sondern schließen sich gegenseitig aus. Dies ist ein Spezialfall eines allgemeinen Prinzips, das man nach Niels Bohr *Komplementarität* nennt.**

Man kann eine allgemeine Regel formulieren, wann Quantenobjekte trotz mehrerer klassisch denkbarer Möglichkeiten nicht zu einem Interferenzmuster beitragen: Dies ist dann der Fall, wenn das Experiment – zum Zeitpunkt der Detektion dieser Quantenobjekte auf dem Schirm - eine Information enthält, die man eindeutig einer der klassisch denkbaren Möglichkeiten zuordnen kann. In unserem Beispiel sind die klassisch denkbaren Möglichkeiten das Durchqueren des linken oder des rechten Spaltes. Die Information über diese beiden Möglichkeiten wird von den gestreuten Photonen getragen. Wir können *sehen*, ob das Photon, das in unser Auge fällt, vom linken oder vom rechten Spalt kommt.

Oft sagt man auch kurz: Ein Interferenzmuster kann nicht beobachtet werden, wenn die klassisch denkbaren Möglichkeiten unterscheidbar sind. Unterscheidbar heißt also, dass eine Zuordnung im obigen Sinne möglich ist.

**Wesenszug 4: „Komplementarität“**
**Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Möglichkeiten schließen sich aus.**

Der Umkehrschluss gilt nicht. Wenn keine Zuordnung möglich ist, muss nicht automatisch ein Interferenzmuster auftreten. Z. B. kann das Interferenzmuster ausbleiben, wenn die Werte für die Geschwindigkeiten der Quantenobjekte zu stark streuen (weil dementsprechend auch die de-Broglie-Wellenlänge streut).

# 3 Weitere quantenmechanische Effekte

Neben den vier genannten Wesenszügen, die die Grundeigenschaften der Quantenmechanik abbilden sollen, gibt es noch eine ganze Anzahl von Effekten, die man als typisch quantenmechanisch bezeichnen kann. Viele von ihnen werden auch im Unterricht der Oberstufe regelmäßig behandelt. Die wichtigsten von ihnen werden im Folgenden zusammengestellt.

## 3.1 Fotoeffekt

Das Auslösen von Elektronen aus Metalloberflächen durch einfallendes Licht wird als *Fotoeffekt* bezeichnet. Einsteins Deutung des Fotoeffekts als „Stoß“ zwischen einem einfallenden Photon und dem Elektron, das dabei aus dem Metall herausgeschlagen wird, war historisch der erste Hinweis auf die Quantennatur des Lichts.

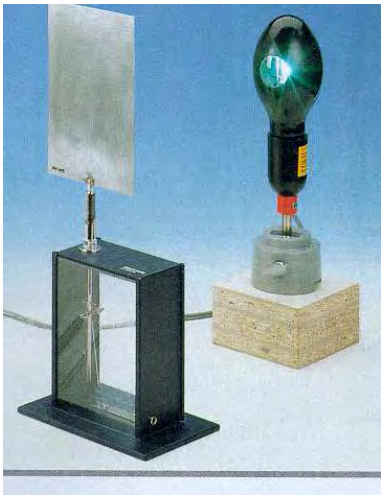

Abbildung 10: Versuchsaufbau zum Fotoeffekt

Die einfachste experimentelle Möglichkeit, den Fotoeffekt qualitativ zu demonstrieren, besteht darin, eine geladene Zinkplatte mit dem Licht einer Quecksilberdampflampe zu bestrahlen (Abb. 10). Die Zinkplatte entlädt sich rasch. Bringt man zwischen Lampe und Zinkplatte eine Glasplatte, die den UV-Anteil des Lichts absorbiert, ist der Effekt selbst bei starker Bestrahlung nicht nachzuweisen.

Dies lässt sich nicht ohne weiteres in Einklang mit der klassischen Wellentheorie bringen und deutet auf die Quantennatur des Lichtes hin. In der Deutung von Einstein besitzt Licht Teilchencharakter. Jedes Photon trägt die Energie $hf$. Beim Stoß mit einem Elektron wird diese Energie auf das Elektron übertragen.

Der Fotoeffekt ist ein traditioneller „Einstieg“ in die Quantenphysik. Eine seiner didaktischen Funktionen besteht darin, dass man mit ihm experimentell den Wert der Planckschen Konstante $h$ bestimmen kann. Dazu ist ein komplizierterer Versuchsauf-

bau nötig, der Gebrauch von der Gegenfeldmethode macht. Für die Sekundarstufe I ist dieser Versuch sicherlich zu komplex.

Der traditionelle Einstieg in die Quantenphysik anhand des Photoeffekts und des Photonenkonzepts ist in der neueren fachdidaktischen Literatur kritisiert worden. Gabriel und Garber (1981) und die Autoren des Berliner Konzepts (Berg et al. 1989) plädieren für einen Beginn mit Elektronen. Fischler (1992) kritisiert die traditionelle Vorgehensweise mit der folgenden Begründung: „In vielen Untersuchungen (z. B. Lichtfeldt 1992) wird festgestellt, dass die Schüler den Photonen Teilchencharakter zuschreiben, die vorsichtigeren Begriffe Energie-Portion oder Lichtquant werden zugunsten anschaulicherer Beschreibungen schnell aufgegeben. Es hat sich in der Regel ein Bild festgesetzt, in dem die Photonen in ganz klassischem Sinn auf Elektronen prallen und diese aus dem Festkörper herauslösen. Es ist zu vermuten, dass man diese Verbindung, die die Schüler zwischen dem beobachteten Phänomen, der gegebenen Deutung und klassischen mechanistischen Vorstellungen herstellen, kaum aufbrechen kann, solange man am Photon an dieser Stelle des Unterrichts festhält."

## 3.2 Energiequantisierung in Atomen

Energie kann von einem einzelnen Atom nur in ganz bestimmten Portionen aufgenommen oder abgegeben werden. Eine Anregung mit einer „nicht passenden" Energie ist nicht möglich. Diesen Effekt bezeichnet man als Energiequantisierung.

In folgendem Versuch wird die Energiequantisierung sichtbar: Kochsalz wird mit einem Bunsenbrenner erhitzt, so daß sich die Flamme gelb färbt. Beleuchtet man die Flamme mit einer Natriumdampflampe, wirft sie einen Schatten. Das Licht einer Quecksilberdampflampe durchdringt die Flamme dagegen, ohne absorbiert zu werden.

Zum Verständnis des Versuches benötigt man den Zusammenhang zwischen Energie und Frequenz von Licht ($E = hf$). Das Licht der Na-Lampe weist eine ausgeprägte gelbe Spektrallinie, die gerade die richtige Energie besitzt, um die im Grundzustand befindlichen Na-Atome in der Flamme anzuregen (Resonanzabsorption). Das Licht eines anderen Elementes enthält dagegen keine Spektrallinie mit der richtigen Energie und kann deshalb die Na-Atome nicht anregen.

Das Verhalten bei der Energieaufnahme und -abgabe wird erklärlich durch die Annahme von Energiestufen im Atom. Im Unterricht der Sekundarstufe II wird diese Erkenntnis meist durch den Franck-Hertz-Versuch vertieft. Historisch wurden die Energieniveaus erstmal von Bohr in seinem Atommodell postuliert. Die Elektronen im Atom können nur ganz bestimmte Werte der Energie annehmen. Diese Eigenschaft ist auch im Atommodell der Quantenmechanik kennzeichnend für Atome.

In der Quantenmechanik wird auch die Ursache der Energiequantisierung erkennbar. In ihrer einfachsten Form tritt sie beim Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden auf. Die Randbedingungen an die Wellenfunktion sind nur für ganz bestimmte Frequenzen (und damit Energien) erfüllbar. Der „Mechanismus" der Quantisierung ist der gleiche wie bei der „Quantisierung" der möglichen Schwingungsfrequenzen

einer eingespannten Saite (Grund- und Oberschwingungen). Es ist daher argumentiert worden, dass die quantenmechanische Energiequantisierung nicht unbedingt ein kennzeichnendes Element quantenmechanischer Phänomene ist.

## 3.3 Welle-Teilchen-Dualismus

In vielen populärwissenschaftlichen Texten, aber auch in einigen älteren Schulbüchern wird das mysteriöse Verhalten von Quantenobjekten auf den Dualismus von Welle und Teilchen reduziert. Es wird die Vorstellung vermittelt, der Indeterminismus der Quantenmechanik bestünde darin, dass man nicht vorhersagen kann, ob sich ein Quantenobjekt in einem bestimmten Experiment als Teilchen oder als Welle verhält.

Das ist irreführend. Es ist wahr, dass sich die Beschreibung von Quantenobjekten nicht auf ein reines Wellen- oder Teilchenmodell reduzieren lässt. Das ist eine bemerkenswerte Tatsache, die den klassischen Vorstellungen widerspricht und die im Unterricht gebührend gewürdigt werden muss.

In der Quantenmechanik wird das „Rätsel“ des Welle-Teilchen-Dualismus durch die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation vollständig aufgelöst: Die Wellenfunktion gehorcht Wellengesetzen, und ihr Betragsquadrat gibt die Wahrscheinlichkeit an, das Quantenobjekt an der betreffenden Stelle zu finden. Für jedes Experiment kann man eindeutig vorhersagen, ob man „Wellenverhalten“ oder „Teilchenverhalten“ finden wird.

Die oben diskutierten Wesenszüge geben dies in qualitativer Form ebenso differenziert wieder. Auch einzelne Quantenobjekte besitzen die Möglichkeit, zu einem Interferenzmuster beizutragen (Wesenszug 1). Wenn man aber eine Ortsmessung durchführt (z. B. mit einem Schirm im Doppelspaltexperiment) wird man einen bestimmten Messwert des Ortes finden (Wesenszug 3): Man wird das Quantenobjekt lokalisiert, also teilchenhaft nachweisen. Kennt man die Beschreibung durch Wesenszüge, haftet dem Welle-Teilchen-Dualismus nichts Mysteriöses mehr an. Zwar sind anschauliche Vorstellungen immer noch schwierig zu bilden, aber einer rationalen Deutung entziehen die Phänomene sich nicht mehr.

## 3.4 Unbestimmtheit

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation wird sicher von vielen als eine der wichtigsten Inhalte der Quantenmechanik angesehen werden. Was man darunter verstehen soll, d. h. wie man die Relation $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ interpretieren soll, darüber gehen die Meinungen sehr stark auseinander (wenn auch die Intensität der Debatte um die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation unter Physikern nachgelassen hat).

Auf die verschiedenen Interpretationsansätze zum Verständnis der Unbestimmtheitsrelation wird weiter unten im Zusammenhang mit den Interpretationsfragen der Quantenmechanik noch ausführlicher eingegangen (s. auch die Übersicht in Müller & Wiesner 1997a).

Der Vielzahl der Interpretationen entspricht auch eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Unbestimmtheitsrelation misszuverstehen. Auf die verschiedenen Schülervorstellungen im Zusammenhang mit der Unbestimmtheitsrelation wird ebenfalls weiter unten ausführlicher eingegangen. Auf jeden Fall muss man die möglichen unerwünschten Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern bei der Planung des Unterrichts sorgältig im Auge behalten.

Es gibt verschiedene Ansätze, die Unbestimmtheitsrelation im Unterricht einzuführen. Alle sind jedoch nur mit gewissen fachlichen Einschränkungen tauglich und können bei mangelnder Sorgfalt im Unterricht bei den Schülerinnen und Schülern zu Fehlvorstellungen führen (vgl. die Diskussion in Müller & Wiesner 1997b). Stichwortartig seien die folgenden Zugänge genannt:

- Heisenberg-Mikroskop.
  In diesem von Heisenberg stammenden Gedankenexperiment wird eine „Störungsvorstellung“ aufgebaut. An einem Elektron soll eine Ortsmessung vorgenommen werden. Dazu wird es mit Licht beleuchtet. Das beleuchtete Elektron streut das Licht, so dass man es mit einem Mikroskop betrachten kann. Nun ist aus der Theorie des Mikroskops bekannt, dass sein Auflösungsvermögen durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts und den Öffnungswinkel begrenzt ist. Die Lokalisierung des betrachteten Objekts gelingt nur etwa innerhalb einer Wellenlänge. Mit dem Mikroskop kann man um so kleinere Strukturen auflösen je kurzwelliger das zur Beleuchtung benutzte Licht ist.

  Auf der anderen Seite ist die Streuung des Lichts ein quantenhafter Vorgang. Das Elektron erhält bei der Streuung des Lichts wegen des Compton-Effekts einen Rückstoß $\Delta p$, der nicht genau bekannt ist, da das emittierte Lichtquant eine beliebige Richtung besitzen kann, solange es nur die Linse des Mikroskops passiert und ins Auge gelangt. Das Argument kann zu einer semiquantitativen Abschätzung des Rückstoßimpulses herangezogen werden. Er ist in der Größenordnung von $h/\Delta x$ (Ortsauflösung des Mikroskops).

- Unschärfe von Wellenpaketen.
  Schon aus der klassischen Optik ist bekannt, dass man durch Überlagerung von ebenen Wellen $\sin(kx - \omega t)$ mit leicht verschiedenen Wellenzahlen $k$ lokalisierte Wellenpakete erhalten kann. Für ein solchermaßen konstruiertes Wellenpaket kann man in der Theorie der Fourier-Transformationen zeigen, dass es nicht möglich ist, durch Superposition von Wellen aus einem beschränkten Wellenzahlbereich $\Delta k$ Wellenpakete zu konstruieren, deren Ortsausdehnung kleiner als $1/\Delta k$ ist. Es gilt also eine Unschärferelation der Form $\Delta x \Delta k \geq \frac{1}{2}$.

  Man kann sich dieses Argument heuristisch plausibel machen, indem man sich auf zwei Wellenzüge mit unterschiedlichem $k$ beschränkt und die Bedingungen für konstruktive und destruktive Interferenz analysiert (s. z. B. Kuhn (2000)). An mathematischen Voraussetzungen benötigt man dafür die Sinusfunktion, ein Verständnis der Wellenausbreitung und die Begriffe der konstruktiven und destruktiven Interferenz.

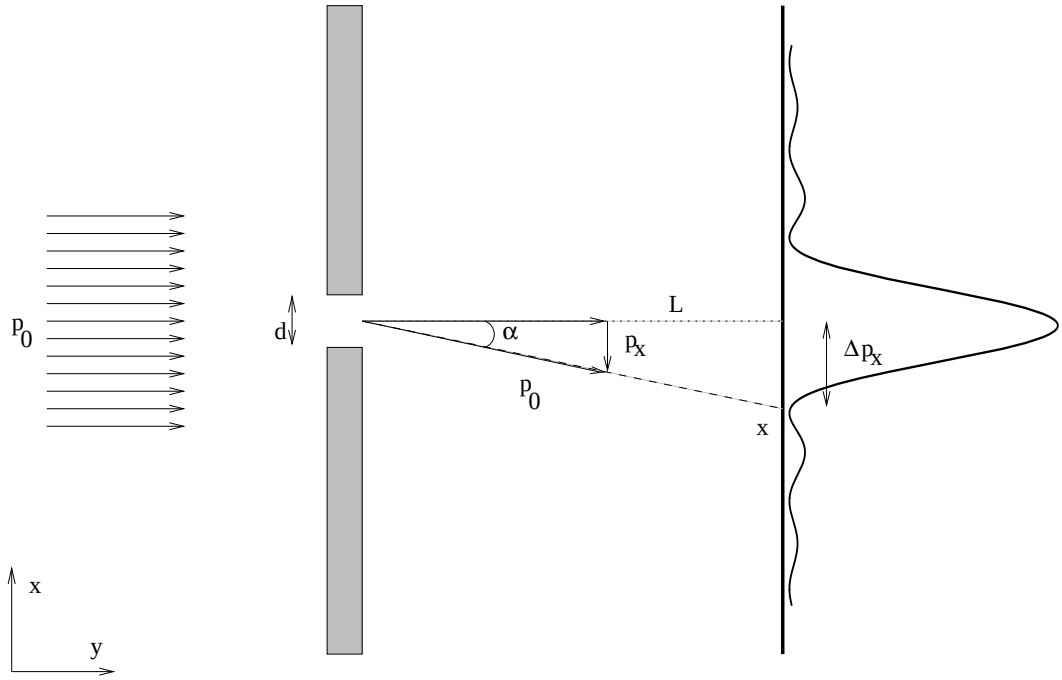


Abbildung 11: Geometrie des Einzelspalt-Experiments

- Beugung am Einzelspalt.
  Ausgangspunkt dieses Gedankenexperiments ist die Beobachtung, dass sich ein Lichtbündel (Wellenlänge $\lambda$) durch einen engen Spalt nicht beliebig schmal machen lässt. Fällt es durch einen Spalt der Breite $d$, dann weitet es sich hinter dem Spalt auf. Die durch Beugung verursachte Aufweitung ist umso stärker, je enger der Spalt ist.

  Ähnliches gilt auch für Elektronen und andere Quantenobjekte. Wenn man Elektronen betrachtet, die mit Impuls $\vec{p}_0$ auf einen Spalt treffen (Abb. 11), zeigt sich auf dem Schirm die charakteristische Beugungsfigur. Das Hauptmaximum befindet sich direkt hinter dem Spalt, die Interferenzminima 1. Ordnung findet man bei einem Winkel $\alpha$. Beim Durchgang durch den Spalt verringert sich die Orts-Unbestimmtheit der Elektronen in $x$-Richtung. Das Auftreten der Beugungsfigur wird so gedeutet, dass sich dadurch die Unbestimmtheit im Impuls vergrößert, dass also das Elektron mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine von Null verschiedene Impulskomponente $p_x$ besitzt.

  Setzt man die Spaltbreite als Ortsunbestimmtheit an und schätzt die Impulsunbestimmtheit aus der Streuung der innerhalb des Hauptmaximums gefundenen Elektronen ab (wobei man die de-Broglie-Relation benutzt), dann gelangt man zur Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim h.$$

#### Unbestimmtheitsrelation und klassische Fehlvorstellungen

Wenn man keine quantitativen Überlegungen anstellen möchte, sondern die Unbestimmtheitsrelation qualitativ einführen will, muss man besondere Sorgfalt in der begrifflichen Formulierung walten lassen. Am saubersten lässt sich die Unbestimmtheitsrelation in der Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik einführen. Hier wird die Unbestimmtheitsrelation als eine Aussage über die gleichzeitige *Präparierbarkeit* zweier physikalischer Größen (z. B. Ort und Impuls) an einem Ensemble von Quantenobjekten formuliert. Dies kann durchaus qualtitativ geschehen (z. B. am Beispiel des Einzelspalts). Auf diesen Zugang wird im Abschnitt über Interpretationen näher eingegangen.

Mit welchen Problemen in Bezug auf unerwünschte Schülervorstellungen die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation verbunden ist, kann man am Beispiel des Heisenberg-Mikroskops erläutern. In diesem verbreiteten Zugang ist ja der Kern der Argumentation: Falls man versucht, den Ort eines Elektrons durch Beleuchtung mit hinreichend kurzwelligem Licht zu ermitteln, wird durch den unkontrollierbaren Rückstoß des gestreuten Photons der Impuls des Elektrons derart gestört, dass die Unbestimmtheitsrelation erfüllt ist.

Warum ist es wahrscheinlich, dass diese Argumentation zu unerwünschten Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler führt? Da bei diesem Argument mit einer „Störung“ des Impulses durch das gestreute Licht argumentiert wird, wird sich bei den Schülerinnen und Schüler fast zwangsläufig die Vorstellung ergeben, dass das Elektron vor der Störung einen bestimmten Impuls gehabt hat (was sollte sonst gestört werden?). Da das Elektron vor der Messung auch einen bestimmten Ort gehabt haben soll, wird man – ganz im Gegensatz zum Zweck des Gedankenexperiments – zu Schülervorstellungen aus der klassischen Physik geführt. Dieses Beispiel zeigt exemplarisch, wie viel begriffliche Sorgfalt man bei der Einführung der Unbestimmtheitsrelation walten lassen muss.

## 3.5 Tunneleffekt

Auch der Tunneleffekt wird oft als ein Charakteristikum der Quantenmechanik dargestellt. In der klassischen Physik kann ein Gegenstand (z. B. eine rollende Kugel) einen Potentialwall nur dann überwinden, wenn ihre Gesamtenergie größer ist als die potentielle Energie des Walls.

Ein Quantenobjekt kann eine Potentialbarriere mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durchdringen, selbst wenn seine Energie zum Überwinden des Walls eigentlich nicht ausreicht. Es „durchtunnelt“ den Wall. Formal wird dieser Vorgang dadurch beschrieben, dass die Wellenfunktion des Elektrons ein Stück weit in die „klassisch verbotene Zone“ hineinreicht.

Eine der bekanntesten Anwendungen des Tunneleffekts ist das *Rastertunnelmikroskop* (Abb. 12), mit dem erstmals atomare Strukturen direkt sichtbar gemacht werden konnte. Eine feine Spitze rastert die Oberfläche des zu untersuchenden (elektrisch leitenden) Objekts ab. Weil eine Spannung zwischen Oberfläche und Spitze angelegt

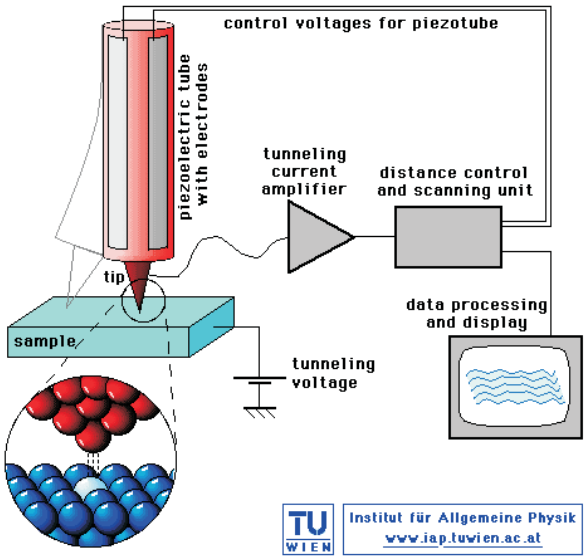


Abbildung 12: Schemazeichnung eines Rastertunnelmikroskops

wird, entsteht eine Potentialbarriere, die von Elektronen durchtunnelt werden kann, wenn der Abstand zwischen Oberfläche und Spitze klein genug ist. Die tunnelnden Elektronen sind als Tunnelstrom nachweisbar.

Die Höhe der Nadel über der Oberfläche läßt sich sehr genau regulieren. Sie wird so eingestellt, dass zwischen der Nadelspitze und der Oberfläche ein nachweisbarer Tunnelstrom fließt. Beim Abrastern wird die Höhe der Nadel laufend so eingestellt, daß der Tunnelstrom einen konstanten Wert behält. Dies garantiert, dass die Nadel immer im gleichen Abstand zur Oberfläche bleibt. Indem man die Nadelhöhe für jeden Punkt aufzeichnet, gewinnt man ein Höhenprofil der Oberfläche.

## 3.6 Einzelne Atome in Atomfallen

„Kann man einzelne Atome sehen?“ ist eine Frage, die bei Schülerinnen und Schülern sicherlich auf Interesse stößt. Mit einem Lichtmikroskop ist dies wegen seines mangelnden Auflösungsvermögens nicht möglich. Mit dem Rastertunnelmikroskop kann man einzelne Atome im Verband eines Festkörpers sichtbar machen. Es ist in den letzten Jahren aber auch gelungen, einzelne Ionen und Atome in sogenannten „Atomfallen“ einzufangen und durch Beleuchtung mit Laserlicht nachzuweisen.

Abb. 13 zeigt den den prinzipiellen Aufbau einer Paul-Falle, die zum Speichern von geladenen Teilchen geeignet ist. Die wesentlichen Elemente sind eine Ringelektrode, die den Bereich der eingefangenen Ionen umschließt und zwei Deckelelektroden, die ihn nach oben und unten abschließen (vgl. Kuhn 2000). Durch Anlegen einer elektrischen Spannung werden die Deckelelektroden positiv und die Ringelektroden negativ aufgeladen. Die positiv geladenen Ionen im Falleninnern werden dann zur Ringelektrode hin- und von den Deckelelektroden weggezogen. Nach sehr kurzer

Abbildung 13: Prinzipaufbau einer Paul-Falle

Zeit wird die Spannung umgepolt, so daß die Ionen nun von der Ringelektrode abgestoßen werden. Ist die Frequenz der angelegten Wechselspannung hoch genug, können die Ionen keine der Elektroden erreichen. Durch die „dynamische Stabilisierung“ bleiben sie in der Fallenmitte. So kann man einzelne Ionen in der Paul-Falle fangen und ihre Eigenschaften studieren. In Abb. 14 sind fünf einzelne Magnesium$^+$-Ionen gezeigt, die in einer Paul-Falle eingefangen wurden. Der Abstand zwischen ihnen beträgt etwa 25 $\mu$m.

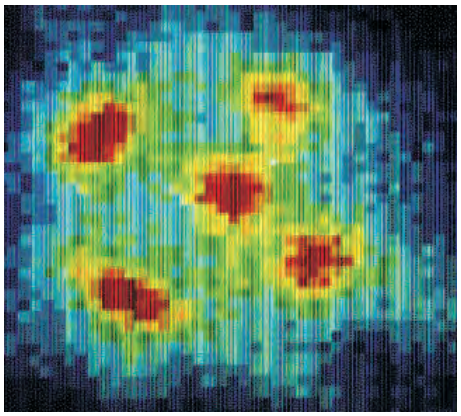

Abbildung 14: Fünf $Mg^+$-Ionen in einer Paul-Falle

Es gibt bemerkenswerte Schulaktivitäten zum Thema „Paul-Falle“. In einer „Jugend forscht“-Arbeit haben zwei Schüler mit einfachen Mitteln das Modell einer Paul-Falle gebaut und damit Staubteilchen eingefangen und sichtbar gemacht (www.quantenphysik-schule.de/paulfalle.htm). Abb. 13 ist aus dieser Arbeit ent-

nommen und zeigt die zentralen Bestandteile des Aufbaus, die Elektroden. Ebenso entstand an der Universität Mainz ein Modellaufbau einer Paul-Falle mit einfachen Mitteln.

Das Thema „Atome sehen“ im Zusammenhang mit Ionenfallen ist für die Schülerinnen und Schüler sicher sehr motivierend. Man muss sich jedoch darüber im Klaren sein, dass man dabei nichts über Quantenphysik lernt. Zum Verständnis einer Ionen-Falle benötigt man ausschließlich Wissen aus der klassischen Physik (elektrische und magnetische Felder). Dass man Atome mit einem Lichtmikroskop nicht sehen kann, lässt sich allein mit der klassischen Optik begründen. Will man etwas über Quantenphysik lernen, ist das Thema Atom- und Ionenfallen höchstens als motivierender Einstieg geeignet.

## 3.7 Schrödingers Katze

In populärwissenschaftlichen Büchern wird immer wieder das Paradoxon von Schrödingers Katze angesprochen, aber selten wird es so erklärt, dass man die quantenmechanischen Hintergründe tatsächlich verstehen kann. An diesem Punkt zeigt sich die Leistungsfähigkeit der Formulierung durch die vier Wesenszüge: Schrödingers Katzenparadoxon kann ohne große Mühe auf Wesenszug 2 zurückgeführt werden.

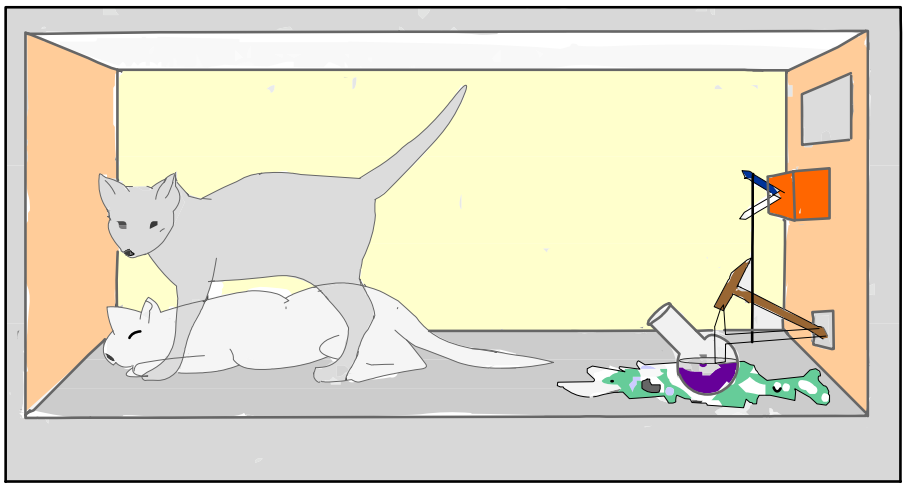

Abbildung 15: Schrödingers Katze

In Schrödingers Originalformulierung von 1935 lautet das Paradoxon wie folgt (Abb. 15): „Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Häm-

merchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die $\psi$-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind."

Man kann das Problem vom Schrödingers Katze auf unsere Diskussion des Doppelspalt-Experiments im Zusammenhang mit Wesenszug 2 zurückführen. Dazu nehmen wir an, dass das Relais, welches das Hämmerchen auslöst, nicht von einem radioaktiven Zerfall ausgelöst wird, sondern von einem Detektor für Elektronen. Dieser Detektor befindet sich neben dem linken Spalt des Doppelspaltexperiments. Ein einzelnes Elektron wird durch den Doppelspalt geschickt. Wenn es durch den linken Spalt geht, wird es vom Detektor nachgewiesen, das Hämmerchen zertrümmert den Blausäure-Kolben und die Katze stirbt. Wenn das Elektron dagegen durch den rechten Spalt geht, spricht der Detektor nicht an und die Katze bleibt unversehrt.

Nun haben wir in Abschnitt 2.3.3 („Elektronen ohne Ortseigenschaft") argumentiert, dass man Elektronen im Doppelspaltexperiment die Eigenschaft „Ort" in der Spaltebene gar nicht zuordnen darf. Das Elektron geht nicht „entweder links oder rechts", sondern es befindet sich in einem quantenmechanischen Überlagerungszustand aus beiden Alternativen. Diese quantenmechanische Überlagerung wird nun durch den Versärkungsmechanismus ins Makroskopische übertragen – und genau dies war die Absicht Schrödingers.

Wenn man dem Elektron die Eigenschaft „links" oder „rechts" nicht zuordnen kann, ist auch das Relais, das Hämmerchen und schließlich die Katze in einem Überlagerungszustand. Man kann der Katze die Eigenschaften „lebendig" oder „tot" nicht mehr zuordnen.

Es ist wichtig zu betonen: Wie bei den Elektronen hinter dem Doppelspalt handelt es sich in Schrödingers Gedankenexperiment beim Zustand der Katze nicht um einen Zustand, in dem man nicht *weiß*, ob die Katze tot oder lebendig ist, sondern sie besitzt tatsächlich diese Eigenschaften nicht. Ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment kann es beim Überlagerungszustand der Katze zu Interferenzerscheinungen zwischen toter und lebendiger Katze kommen. Nun ist es eine evidente Erfahrungstatsache, dass in der Wirklichkeit solche Phänomene nicht vorkommen. Schrödinger ist es also mit diesem Beispiel gelungen, nachdrücklich deutlich zu machen, dass der Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Mechanik nicht ohne Schwierigkeiten zu bewältigen ist.

Schrödingers Katzenparadoxon weist eine enge Verbindung zur Frage auf, wie eine *quantenmechanische Messung* zu beschreiben sei: Anstelle der Katze kann man allein den Elektronendetektor betrachten, der den Nachweis eines Elektrons durch das Aufleuchten einer Lampe anzeigen soll. Wie im Fall der Katze muss man im Gedankenexperiment schließen, dass sich der Detektor nach Durchgang eines Elektrons in einem Überlagerungszustand befindet, in dem die Lampe keine der Eigenschaften „leuchtet" oder „leuchtet nicht" besitzt. Die Quantenmechanik scheint also vorherzusagen, dass sich nach einer Messung das Messgerät in einem Zustand befindet, in

dem es keinen eindeutigen Wert anzeigt. Dies steht im Widerspruch zu allen Erfahrungen mit Messgeräten.

Dieses Problem, das *quantenmechanische Messproblem*, beschäftigt die Physiker seit mehreren Jahrzehnten. Eine endgültige Lösung hat es bislang noch nicht gefunden. Um Übereinstimmung mit dem beobachteten Verhalten von Messgeräten zu erhalten, wurde „von Hand" der abrupte Prozess der *Zustandsreduktion* eingeführt: Bei einer Messung wird die Wellenfunktion nach Zufallsgesetzen aus dem Überlagerungszustand auf eine der Möglichkeiten („Lampe leuchtet" / „Lampe leuchtet nicht") „reduziert". Eine Erklärung der Zustandsreduktion, die es erlaubt, sie aus den Grundgesetzen der Quantenmechanik zu verstehen, steht jedoch noch aus.

In den letzten Jahren zeichnet sich ein wissenschaftlicher Konsens ab, wie man dem Verständnis des Schrödingerschen Katzenproblems (und damit auch dem des quantenmechanischen Messprozesses) näher kommen könnte: über die Theorie der *Dekohärenz*. Die zentrale Idee dabei ist, dass man makroskopische Körper (wie die Katze) nicht isoliert betrachten kann. Sie müssen als mit der Außenwelt wechselwirkende *offene Systeme* aufgefasst werden. Sie besitzen immer eine *natürliche Umgebung*, mit der sie auf vielfältige Weise wechselwirken. Die Katze z. B. streut Licht, gibt Wärmestrahlung ab und beeinflusst die Luftmoleküle in der Umgebung.

Schon beim Doppelspaltexperiment konnte man sehen, dass kein Interferenzmuster auftrat, wenn man jedes Elektron hinter einem der beiden Spalte durch Lichtstreuung nachwies. Dieser Verlust der Interferenzfähigkeit ist unabhängig davon, ob das gestreute Photon von einem Beobachter registriert wurde oder nicht.

Ebenso zerstört die Lichtstreuung (und auch jede andere Wechselwirkung mit der Umgebung) das Kennzeichen eines Überlagerungszustands: die Interferenzfähigkeit zwischen toter und lebendiger Katze. Durch die Wechselwirkung mit ihrer Umgebung wird die Katze „effektiv klassisch". Sie ist tot oder lebendig; Überlagerungen oder Interferenzerscheinungen können nicht nachgewiesen werden.

Schrödingers Frage, warum keine Überlagerungszustände bei makroskopischen Körpern auftreten, wird somit durch die Theorie der Dekohärenz beantwortet: Makroskopische Körper erscheinen klassisch, weil man sie nicht von ihrer Umgebung isolieren kann. Die Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Interferenzfähigkeit. Es gibt jedoch auch besondere Fälle, wo die Isolierung von der Umgebung möglich ist. Dann findet keine Dekohärenz statt und es kommt zu makroskopischen Quantenphänomenen, wie Supraleitung, Suprafluidität und Bose-Einstein-Kondensation.

In jüngster Zeit wird auch der Übergangsbereich zwischen klassischer und Quantenphysik dem Experiment zugänglich. So gelang es 1996, ein Ion in einen Überlagerungszustand aus zwei räumlich um 80 nm getrennten Wellenpaketen zu bringen, deren Ausdehnung jeweils nur 7 nm betrug. Dies stellt eine Überlagerung zweier makroskopisch verschiedener Zustände dar. Die durch die Wechselwirkung mit der Umgebung verursachte Dekohärenz (der Verlust der Interferenzfähigkeit zwischen den beiden Wellenpaketen) konnte in dem Experiment im Detail verfolgt werden.

# 4 Fachliche Voraussetzungen für Quantenphysik-Unterricht in der Sekundarstufe I

Möchte man Quantenphysik in der Sekundarstufe I unterrichten, kann es nicht einen isolierten Abschnitt „Quantenphysik“ geben. Die Quantenphysik benötigt gewisse Voraussetzungen aus der klassischen Physik, die im vorangehenden Unterricht vorbereitet oder im laufenden Unterricht mitgelernt werden müssen. Ohne diese Voraussetzungen sind die quantenmechanischen Phänomene kaum deutbar. Welche Kentnisse im einzelnen benötigt werden, hängt natürlich vom beabsichtigten Unterrichtsverlauf ab. Im Folgenden sind einige Elemente zusammengestellt, auf die vermutlich bei jedem sinnvollen Zugang zur Quantenphysik aufgebaut werden muss.

- Determinismus in der Mechanik
  Einer der entscheidenden Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik ist das prinzipiell deterministische Verhalten klassischer Objekte im Vergleich zum stochastischen Verhalten von Quantenobjekten (Wesenszug 1). Dass es sich bei letzterem um etwas Anderes handelt als um die Unvorhersagbarkeit eines Würfelwurfs wurde oben schon erläutert.

  Damit den Schülerinnen und Schülern dieser Unterschied bewusst werden kann, muss die Vorstellung eines Determinismus in der klassischen Mechanik erst einmal vorhanden sein. Das bedeutet: Wenn die Anfangsbedingungen eines Körpers (Ort und Geschwindigkeit) zu einem anfänglichen Zeitpunkt genau genug bekannt sind und man alle wirkenden Kräfte kennt, kann man die Bahn des Körpers mit den Newtonschen Gesetzen im Prinzip für alle Zeiten vorausberechnen. Dass das in der Praxis nicht geht, weil es oft eine empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen gibt (Chaos), ändert nichts am prinzipiellen Determinismus der Theorie.

Abbildung 16: Determinismus beim Bogenschießen

Man kann sich das mit folgender Analogie veranschaulichen: Ein Bogenschütze, der bei einem Wettkampf auf die Zielscheibe zielt, kann sich sicher sein, dass er ins Schwarze trifft, wenn er den Pfeil mit der richtigen Geschwindigkeit und mit dem richtigen Winkel abschießt (sofern kein Wind weht). Die Bahn des

Pfeils ist durch die Anfangsbedingungen vorherbestimmt. Sind die Anfangsbedingungen gleich, wird der Pfeil immer an derselben Stelle der Zielscheibe landen (Abb. 16). Sinn des Trainings ist das Üben der möglichst guten Reproduktion der Anfangsbedingungen im Wettkampf.

Wenn dieser prinzipielle Determinismus in der klassischen Mechanik nicht vorhanden wäre, hätte das Zielen nicht sehr viel Sinn: Man könnte sich nicht sicher sein, trotz bester Reproduktion der Anfangsbedingungen das Ziel auch zu treffen.

In der Quantenphysik ist der strenge Determinismus der klassischen Physik aufgehoben (vgl. Wesenszug 1: Statistisches Verhalten). Deutlich kann man das am Beispiel des Doppelspalt-Experiments veranschaulichen. Es gibt hier kein „Zielen“. Auch mit der ausgefeiltesten Kontrolle der Anfangsbedingungen kann man nicht erreichen, dass ein bestimmtes Elektron an einer vorher bestimmten Stelle auf dem Schirm landet. Zwei Elektronen, deren Anfangszustand auf dieselbe Weise präpariert wurde, werden im Allgemeinen an verschiedenen Stellen auf dem Schirm landen. Die genaue Position des Detektionspunktes ist unvorhersagbar; man kann lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen für die relative Häufigkeit der Detektionspunkte treffen.

- Begriff der Wahrscheinlichkeit
  Wahrscheinlichkeitsaussagen sind ein zentrales Element der Quantenphysik. Man kann allerdings nicht davon ausgehen, dass in der Sekundarstufe I der Begriff der Wahrscheinlichkeit schon aus dem Mathematikunterricht bekannt ist.

  Für die Quantenphysik ist ein elementares Verständnis von Wahrscheinlichkeiten als relativen Häufigkeiten ausreichend. Man kann sich das am Beispiel des Würfelwurfs leicht verdeutlichen. Etwas komplexer ist der Begriff der Wahrscheinlichkeitsdichte, der benötigt wird, wenn die möglichen Ergebnisse kontinuierlich verteilt sind (wie bei der Ortsmessung im Doppelspaltexperiment). Es gibt dann nicht nur sechs mögliche Ergebnisse wie beim Würfel, sondern unendlich viele. Es ist allerdings nicht nötig den Begriff der Wahrscheinlichkeitsdichte explizit zu thematisieren, wenn man sich die Ergebnisse diskretisiert vorstellt, ähnlich wie die Pixel auf dem CCD-Element einer Digitalkamera. Die Verteilung der Messwerte wird dann wie beim Würfel durch ein Histogramm dargestellt (Abb. 17).

  Den Umgang mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann man üben, indem man die Schülerinnen und Schüler Beispiele für Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus der klassischen Physik zeichnen lässt. Man kann etwa die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den „Nachweis“ eines Radiergummis in der Klasse skizzieren lassen. Sie wird an leeren Plätzen nahezu gleich Null sein und in der Nähe von Schülermäppchen Maxima besitzen.

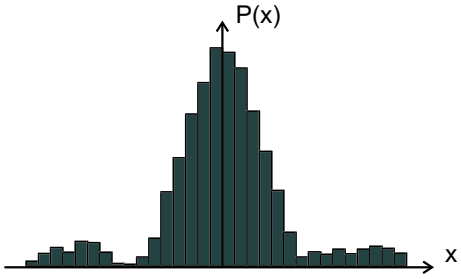


Abbildung 17: Durch Histogramm dargestellte Wahrscheinlichkeitsdichte

- Grundbegriffe der Wellenlehre
  Ein Grundphänomen der Quantenphysik ist die Interferenz (z. B. im Doppelspaltexperiment). Man spricht vom „Welle-Teilchen-Dualismus“, weil sich die Ergebnisse von quantenmechanischen Experimenten teilweise durch Begriffe aus der Wellenlehre beschreiben lassen (Interferenzmaximum, -minimum, de-Broglie-Wellenlänge). Eine zumindest qualitative Vertrautheit mit den Grundbegriffen der Wellenlehre ist daher zum Verständnis der Quantenphysik erforderlich.

  In einem qualitativ ausgerichteten Kurs benötigt man den Begriff der de-Broglie-Wellenlänge nicht unbedingt. Erst wenn quantitative Berechnungen (z. B. Abstand der Interferenzmaxima) durchgeführt werden sollen, wird die de-Broglie-Wellenlänge benötigt. Unverzichtbar zum Verständnis der beobachteten Phänomene ist dagegen der Begriff der Interferenz. Im Doppelspaltexperiment wird immer wieder Bezug auf Interferenzmaxima und -minima genommen. Die Grundidee des Entstehens von konstruktiver und destruktiver Interferenz sollte daher bekannt sein. Eine quantitative Behandlung ist zum Verständnis der Phänomene allerdings nicht nötig; die Interferenz kann in qualitativer Weise eingeführt werden.

  Wenn man die Quantenphysik so früh wie möglich unterrichten möchte, wird man nicht vermeiden können, Elemente der Wellenlehre mitzubehandeln. Als Beispiel für eine konkrete Umsetzung ist in Tabelle 1 ein Auszug aus dem bayerischen Lehrplan von 2003 für die Klasse 11 wiedergegeben, in dem ebenfalls eine „möglichst frühe“ Auseinandersetzung mit der Quantenmechanik beabsichtigt ist.

Tabelle 1:
Auszug aus dem Lehrplan für das neunjährige Gymnasium in Bayern (2003)

**Ph 11.3 Einblick in die Quantenphysik (ca. 15 Std.)**
Die Schüler erarbeiten sich grundlegende Kenntnisse über Wellen und deren Ausbreitung. Experimente verdeutlichen den Wellen- und Teilchencharakter von Licht sowie von Masseteilchen und führen zu einer neuen Physik – der Quantenphysik. Die Jugendlichen gewinnen einen Einblick in grundlegende Inhalte und Denkweisen dieser Theorie sowie deren Auswirkungen auf moderne Technologien. Dabei wird ihnen bewusst, dass ihre bisherige, von der klassischen Mechanik bestimmte Anschauung in bestimmten Fällen versagt und dass die Quantenphysik zwangsläufig zu einem fundamental anderen physikalischen Weltbild führt.

- Wellenphänomene in verschiedenen Bereichen der Physik

  Grundbegriffe: Transversal- und Longitudinalwellen
  Interferenz zweier Wellen, Beugung
  Stehende Wellen
  (NTG: zweidimensionale stehende Wellen)

- Wellencharakter und Teilchencharakter des Lichts

  Interferenz von Licht am Doppelspalt
  qualitativer Nachweis des Photoeffekts und dessen Deutung durch Photonen, Energie von Photonen
  (Vertiefungsmöglichkeit NTG: Spektrum elektromagnetischer Wellen)

- Teilchencharakter und Wellencharakter von Elektronen

  Demonstration der Elektronenbeugung im Experiment

- Photonen und Masseteilchen als Quantenobjekte

  Unmöglichkeit der Vorhersage von Einzelereignissen
  statistische Deutung bei einer großen Anzahl von Quantenobjekten
  Hinweis auf die Quantenphysik als Grundlage moderner Technologien (z. B. Halbleiter, Laser)
  Vertiefungsmöglichkeit: Unbestimmtheitsrelation von Heisenberg (Plausibilitätsbetrachtung bei der Beugung am Einfachspalt, Aufhebung des Bahnbegriffs)

Quelle: http://isb.contentserv.net/3.1/g9.de/

# 5 Lernumgebungen: Das Simulationsprogramm zum quantenmechanischen Doppelspaltversuch

Das Doppelspaltexperiment wird vermutlich in jedem qualitativ orientierten Zugang zur Quantenmechanik an zentraler Stelle stehen. Leisen (2000) bezeichnet das Doppelspaltexperiment als „didaktischen Alleskönner“.

Nach Leisen steckt im Doppelspaltexperiment:

- das „Wellige“, das „Körnige“ und das „Stochastische“ der Quantenphysik,
- die Heisenbergsche Unschärferelation,
- die Frage des Messprozesses,
- die Frage der Nichtlokalität,
- viele andere wichtige Experimente,
- die ganze Palette der Interpretationen.

Kurzum: Im Doppelspaltexperiment „steckt“, was in der Quantenphysik erstrangig ist.

Trotz der beträchtlichen Möglichkeiten, die der Doppelspaltversuch in der Schule bietet, war man in der Vergangenheit immer noch auf eine rein rezeptive Vermittlung angewiesen. Der immense apparative Aufwand verbietet eine praktische Demonstration im Realexperiment. Auch die Möglichkeiten, den Unterricht mit Hilfe entsprechender Medien (z. B. interaktiver Bildschirmexperimente) anschaulicher zu gestalten, sind bislang sehr beschränkt: Die Realversuche sind vom Aufbau her äußerst unanschaulich und die Auswertung läuft – wie heute fast überall – rein rechnergestützt. Ein sinnvoller Lehrfilm ist hier also schon prinzipiell kaum realisierbar. Einzig verfügbar ist momentan der Trickfilm, der im Zusammenhang mit dem Unterrichtskonzept von Brachner und Fichtner (1977, 1980) erstellt wurde. Er ist von der Grundkonzeption sehr sinnvoll aufgebaut, kann aber aus technischer Sicht den Anforderungen, die an zeitgemäßes Lehrmaterial gestellt werden dürfen, kaum gerecht werden. Auch im Schulsoftwarebereich sucht man vergeblich nach entsprechenden Lösungen.

Diese Lücke schließt das schon oben erwähnte Simulationsprogramm, das kostenlos von der Internetseite der Physikdidaktik an der Universität München heruntergeladen werden kann (http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/∼milq/download.html) Mit dem Programm sollen Schüleraktivitäten gefördert werden, daher wurde das Simulationsprogramm als virtuelles Labor konzipiert. Wie vom realen Versuchsaufbau her gewohnt, soll den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geboten werden, sich gleichsam „im Labor zu bewegen“ und die Apparatur aus beliebiger Perspektive zu betrachten. Die Möglichkeit, alle Parameter zu verändern und die Auswirkungen direkt auf dem Schirm beobachten zu können, lädt zum selbständigen Erforschen des Experiments ein.

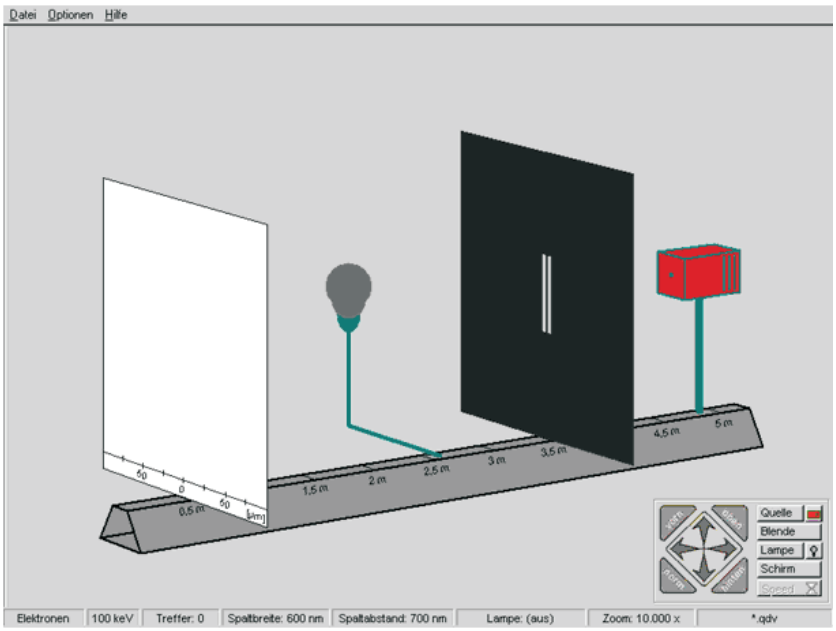


Abbildung 18: Das virtuelle Labor im Simulationsprogramm

Alle im Zusammenhang mit den Wesenszügen der Quantenphysik geschilderten Experimente können mit dem Simulationsprogramm durchgeführt werden. Im Folgenden sollen die Komponenten des Labors und ihre Bedienung näher erläutert werden. Der Grundaufbau ist sehr einfach (Abb. 18): Eine optische Bank auf der von rechts nach links eine Quelle, eine Blende mit (Doppel-) Spalt, eine Lampe zur Spaltbeleuchtung und ein Schirm angeordnet sind. Der Aufbau ist analog zum Schulversuch, mit dem Beugung und Interferenz von Licht demonstriert werden. Man kann die Apparatur von allen Seiten betrachten. Dazu verwendet man das „Drehkreuz“ am unteren rechten Bildschirmrand. Mit den dreieckigen Knöpfen lassen sich vier sinnvolle Perspektiven direkt anwählen. Am unteren Bildschirmrand befindet sich die Statusleiste, die die Werte der wichtigsten Parameter enthält und auf diese Weise über den aktuellen Zustand des Labors informiert.

Wie im Realversuch können an den Laborkomponenten Schirm, Lampe, Blende und Quelle eine Reihe von Parametern variiert werden. Zu jedem Bauteil steht ein Fenster zur Verfügung, das alle notwendigen Regler enthält. Um eines dieser Einstellungsfenster zu öffnen klickt man direkt in der Labordarstellung auf die gewünschte Komponente oder benutzt den entsprechend beschrifteten Knopf im Bedienpanel unten rechts. Durch Mausklick auf den Laborhintergrund kann man das aktive Einstellungsfenster wieder schließen. Viele der im Folgenden beschriebenen Funktionen lassen sich auch unter Umgehung der entsprechenden Einstellungsfenster per Tastatureingabe bedienen. Eine Liste der verfügbaren Abkürzungen läßt sich mit Druck auf die F1-Taste einblenden.

### Quelle

Man kann unter zehn „Teilchentypen“ auswählen (Abb. 19): Während mit „Kugeln“ und „Farbspray“ zwei Vertreter aus dem Bereich der klassischen Physik zur Verfügung stehen, lassen sich mit „Photonen“ die bekannten Schulversuche zur Beugung und Interferenz am Einfach- und Doppelspalt simulieren. Die Ergebnisse des Realexperimentes können auf diese Weise qualitativ und quantitativ nachvollzogen werden. Von „Elektronen“ bis „Cs-Atome“ findet man typische Quantenobjekte, deren praktische Untersuchung im Doppelspaltexperiment zum großen Teil schon experimentell geglückt ist. Mit dem Schieberegler am unteren Rand des Einstellungsfensters kann man die kinetische Energie der verwendeten Teilchen einstellen. Zusätzlich wird die de-Broglie-Wellenlänge eingeblendet.

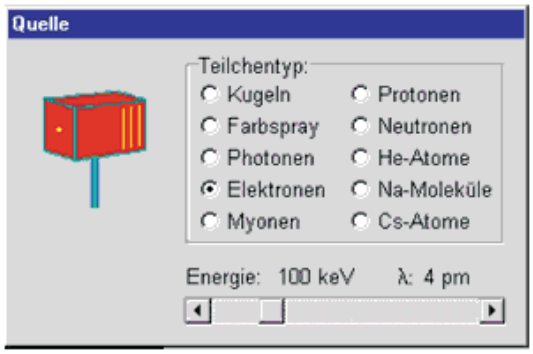


Abbildung 19: Einstellungsfenster „Quelle“

### Blende

Mit den Knöpfen „Spalt 1“ und „Spalt 2“ können die Spalte einzeln geöffnet und geschlossen werden (gedrückter Knopf = Spalt offen). Spaltbreite und Spaltabstand können mit Hilfe der beiden Schieberegler eingestellt werden (Abb. 20).

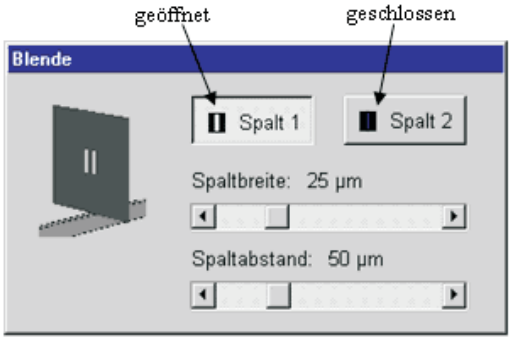


Abbildung 20: Einstellungsfenster „Blende“

### Lampe

Die Lampe hat im virtuellen Labor die Funktion eines Messgerätes für den Ort der Quantenobjekte. Sie beleuchtet die Spaltanordnung und die passierenden Quantenobjekte. Diese streuen das Lampenlicht und der entstehende Lichtblitz lässt Rückschlüsse auf ihre Position bzw. ihren „Weg“ durch die Spaltanordnung zu. Diese Ortsmessung ist ein Beispiel für eine quantenmechanische Messung und erlaubt die Diskussion der begrifflich neuen Aspekte des Messprozesses in der Quantenmechanik (Zustandsreduktion, Bohrsches Komplementaritätsprinzip).

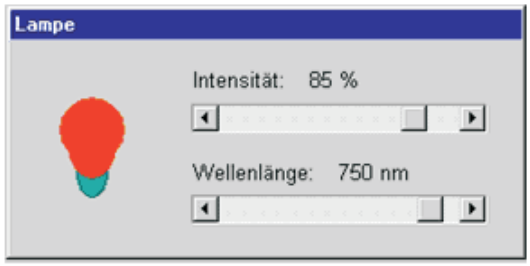


Abbildung 21: Einstellungsfenster „Lampe“

Mit dem Regler „Intensität“ (Abb. 21) wählt man die Leuchtkraft der Lampe, wobei die Prozentangabe den Anteil der Quantenobjekte angibt, der vom Lampenlicht nachgewiesen wird. Beispielsweise wird bei einer Einstellung von 25% nur jedes vierte Teilchen registriert. Der zweite Regler bestimmt die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes. Mit dem Bereich von 380 nm (blau) bis 780 nm (rot) wird das gesamte sichtbare Spektrum abgedeckt.

Das Muster, das sich bei eingeschalteter Lampe auf dem Schirm ergibt, wird folgendermaßen ermittelt: Für jedes Quantenobjekt wird per Zufallsgenerator ermittelt, ob es von der Lampe registriert wird oder nicht. Wird das Objekt als nicht registriert eingeordnet, wird es – wieder per Zufallsgenerator – nach der bekannten Doppelspaltverteilung auf dem Schirm plaziert. Wird es als registriert eingeordnet, so „kollabiert die Wellenfunktion“, d. h. das Quantenobjekt wird einem der beiden Spalte zugeordnet und wird nach der entsprechenden Einzelspaltverteilung plaziert. Dieses Verfahren führt zu einem stetigen Übergang zwischen Doppelspalt-Interferenzmuster und der Überlagerung zweier Einzelspaltverteilungen, wenn der Prozentsatz der nachgewiesenen Teilchen erhöht wird. Physikalisch ausgedrückt: Der Kontrast des Interferenzmusters nimmt ab, wenn die Lampe mehr Teilchen nachweist.

### Schirm

Recht umfangreich präsentiert sich das Einstellungsfenster für den Beobachtungsschirm. Auffallend ist hier zunächst die Aufteilung in die Bereiche „aktueller Versuch“ und „Archiv“. Die Funktionen des linken Fensterbereichs beeinflussen die Schirmanzeige zum aktuellen Versuch.

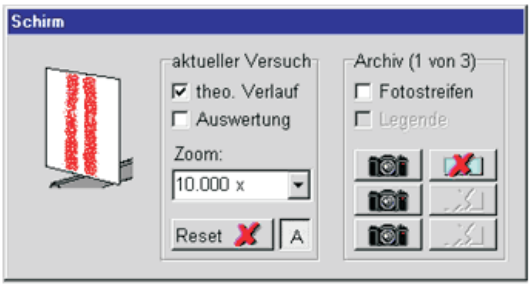


Abbildung 22: Einstellungsfenster „Schirm“

Ist „theo. Verlauf“ aktiviert, so wird am Schirm in blauer Farbe der zu den aktuell gewählten Versuchsparametern theoretisch erwartete Verlauf eingeblendet. Auf diese Weise können die Auswirkungen der einzelnen Parameter erkannt werden, ohne für jede Einstellung abwarten zu müssen, bis eine ausreichende Anzahl von Treffern registriert worden ist.

Bei aktiver „Auswertung“ werden zu jedem $x$-Wert die registrierten Treffer aufsummiert. Es entsteht ein Säulendiagramm über der $x$-Achse, dem die Trefferquote in Abhängigkeit von $x$ direkt entnommen werden kann. Um ein genaues Ablesen zu ermöglichen, wird bei Druck auf die rechte Maustaste neben dem Mauszeiger die aktuelle Schirmposition eingeblendet.

Im Bereich „Archiv“ stehen Hilfsmittel zum Vergleich unterschiedlicher Versuchskonstellationen zur Verfügung. Am Beobachtungsschirm werden im oberen Bereich bei Bedarf drei „Fotostreifen“ eingeblendet, die die Schirmbilder unterschiedlicher Versuche aufnehmen können. Die einzelnen Streifen werden mit den entsprechenden „Kameraknöpfen“ belichtet und – falls sie bereits Bilder enthalten – mit den „Löschknöpfen“ gelöscht.

# 6 Realexperimente zur Interferenz einzelner Quantenobjekte

## 6.1 Mit „einfachen“ Mitteln realisierbare Versuche

Es gibt eine ganze Reihe von Interferenzexperimenten mit einzelnen Quantenobjekten. Historisch als erster hat Taylor 1908 einen Interferenzversuch mit einzelnen Photonen durchgeführt. Das Licht wurde mit rußgeschwärzten Platten stark abgeschwächt und an einer Nadelspitze gebeugt. Das Ergebnis wurde auf langbelichtetem Film festgehalten. Die Originalarbeit von Taylor ist unter
http://www.uni-koblenz.de/∼odsleis/mnuhamburg/taylor.pdf verfügbar. Mit einem Doppelspalt statt der Nadelspitze ist das Experiment im Prinzip in der Schule durchführbar.

Weis und Wynands (2003) (s. auch http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/dualismus/) berichten von einer stark vereinfachten Apparatur, mit der sie das Registrieren einzelner Photonen durch Klicks in einem Lautsprecher hörbar machen. Dies geschieht mit Hilfe eines Photomultipliers. Um ein Interferenzmuster sichtbar zu machen, wird allerdings eine teure CCD-Kamera mit Bildverstärker benötigt.

Alle anderen Interferenzexperimente, die bisher mit einzelnen Quantenobjekten durchgeführt wurden, sind mit Schulmitteln sicher nicht zu realisieren (für Materieteilchen braucht man eine Vakuumapparatur). Man ist daher darauf angewiesen, sekundäre Materialien einzusetzen, wenn man die entsprechenden Experimente behandeln möchte. Natürlich sollen diese Materialien möglichst authentisch sein. Daher sollen im Folgenden einige Experimente ausführlicher vorgestellt werden (vgl. Küblbeck & Müller 2002, Kap. 7).

## 6.2 Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Ein Doppelspaltexperiment mit Elektronen wurde 1961 von Jönsson an der Universität Tübingen durchgeführt (Jönsson 1961). Die Schwierigkeit lag in der Herstellung von nur 0,3 $\mu$m breiten Spalten im Abstand von 1 $\mu$m. Jönsson führte Experimente mit Einfach-, Doppel- und Mehrfachspalten (bis zu Fünffachspalten) durch. Die Elektronenoptik erforderte, die Elektronen auf eine Energie von 50 keV zu beschleunigen, was zur Folge hatte, dass die de-Broglie-Wellenlänge von etwa 0,05 Å wesentlich kleiner als die Spaltdimensionen war. Jönsson musste also mit einem Interferenzmuster rechnen, bei dem Maxima und Minima sehr eng nebeneinander lagen.

Einige von Jönssons experimentellen Ergebnissen sind in Abb. 23 gezeigt. Links sieht man die Verteilung von Elektronen, die einen Einzelspalt durchquert haben, rechts die entsprechende Verteilung für zwei Spalte. Im Doppelspalt-Muster erkennt man die ausgeprägte Streifenstruktur, die sich nicht als „Schattenwurf“ der beiden Spalte deuten lässt.

Abbildung 23: Elektroneninterferenz am Einzelspalt (links) und am Doppelspalt (rechts)

Die klassische Teilchenvorstellung versagt bei der Deutung dieses Experiments. Nach der Quantenphysik zeigen Elektronen am Doppelspalt Interferenz (Wesenszug „Fähigkeit zur Interferenz“). Das Interferenzmuster entspricht qualitativ den Vorhersagen der Quantentheorie. Ein quantitativer Vergleich mit den Vorhersagen der Quantentheorie ist bei diesem Versuch nicht einfach, da durch die notwendige Nachvergrößerung des Interferenzmusters der Abstand zwischen zwei Maxima nicht genau angegeben werden kann.

Auch im linken Teilbild ist ein Interferenzmuster erkennbar. Sehr schwach sind die ersten Nebenmaxima sichtbar, die von der Beugung der Elektronen am Einzelspalt herrühren. Sie entsprechen ebenfalls nicht den Erwartungen des klassischen Teilchenmodells. Dagegen stimmen die experimentellen Resultate mit der Vorhersage der Quantentheorie überein

## 6.3 Einzelne Elektronen im Doppelspaltexperiment

Besonders deutlich wird die Unvereinbarkeit von klassischen Vorstellungen und experimentellen Resultaten, wenn man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten durchführt. Für den Fall von Elektronen gelang dies 1989 am Hitachi Advanced Research Laboratory in Tokio (Tonomura 1989).

Bei diesem Experiment werden die beiden möglichen „Wege“ für die Elektronen nicht durch materielle Spalte realisiert, sondern mit einem sogenannten Elektronen-Biprisma (Abb. 24). Das Biprisma besteht aus zwei parallelen geerdeten Platten mit einem dünnen Draht dazwischen, der gegenüber den Platten positiv aufgeladen ist. Im klassischen Teilchenbild erfahren Elektronen, die am Draht vorbeilaufen, eine zum Draht gerichtete Kraft und werden dadurch abgelenkt. Im Wellenbild entspricht dem eine Phasenverschiebung, die die Wellenfronten "verbiegt"(Abb. 24). Die Überlagerung der links und rechts des Drahtes vorbeigelaufenen Anteile der Wellen führt zum Interferenzmuster in der Beobachtungsebene.

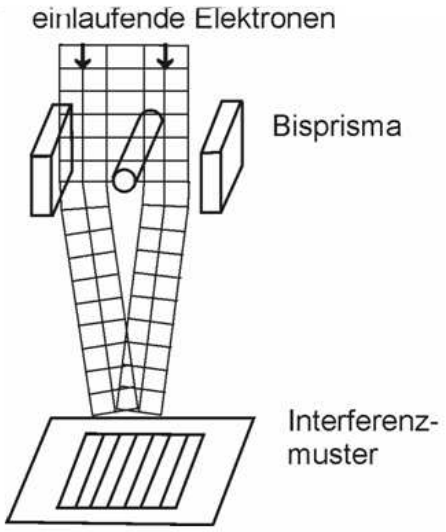


Abbildung 24: Elektronen-Biprisma

Das Interferenzmuster des Biprismas wurde durch eine Elektronenlinse 2000fach vergrößert und auf die Nachweisapparatur projiziert. Diese bestand aus einer Fluoreszenzschicht, in der pro Elektron etwa 500 Photonen erzeugt wurden, die von einem ortsempfindlichen Nachweissystem detektiert wurden. Auf diese Weise konnten die Elektronen einzeln detektiert werden. Das experimentelle Ergebnis ist in Abb. 25 gezeigt. Jedes Elektron hinterlässt einen wohldefinierten „Fleck“ beim Nachweis. Aus vielen Flecken baut sich nach und nach das Interferenzmuster auf.

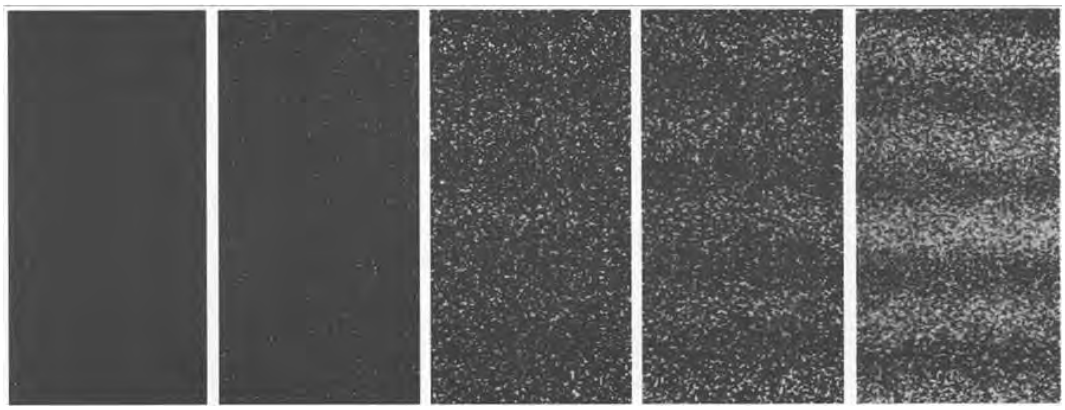

Abbildung 25: Aufbau des Elektronen-Interferenzmusters

Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten illustriert einen weiteren Wesenszug der Quantenphysik, die stochastische Vorhersagbarkeit. Der Detektionsort von einzelnen Elektronen ist nicht vorhersagbar. Die Elektronen in Abb. 25 landen an scheinbar zufälligen Stellen auf der Nachweisschicht. Nur wenn man die Verteilung vieler Elektronen betrachtet, werden wieder Vorhersagen möglich. Je mehr

Elektronen zu einem Interferenzmuster beitragen, um so wahrscheinlicher hat die entstehende Verteilung der Detektionsorte die theoretisch vorhergesagte Form. Die Gesetze der Quantentheorie sind Wahrscheinlichkeitsgesetze.

## 6.4 Neutroneninterferenz

Wellenoptische Experimente sind in zahlreichen Varianten auch mit Neutronen durchgeführt worden (für eine Übersicht s. z. B. Gähler & Zeilinger 1991). Die im Reaktor erzeugten Neutronen wurden dazu durch Stöße mit Moderatorkernen sehr stark gekühlt, d. h. auf sehr geringe Geschwindigkeiten gebracht. In dem im Folgenden beschriebenen Doppelspaltexperiment betrug die mittlere De-Broglie-Wellenlänge 18,45 Å.

Zwei geschliffene Glaskanten wurden bis auf eine kleine Lücke zusammengebracht. Ein Doppelspalt ergab sich durch Aufhängen eines absorbierenden Bor-Drahtes im Zwischenraum zwischen den beiden Glaskanten. Die beiden so erhaltenen Spalte hatten eine Breite von jeweils etwa 22 $\mu$m; getrennt wurden sie von dem 104 $\mu$m breiten Draht. Nach 5 m Fluglänge wurden die Neutronen dann in einer Zählkammer nachgewiesen. Das Ergebnis des Experiments ist in Abb. 26 gezeigt.

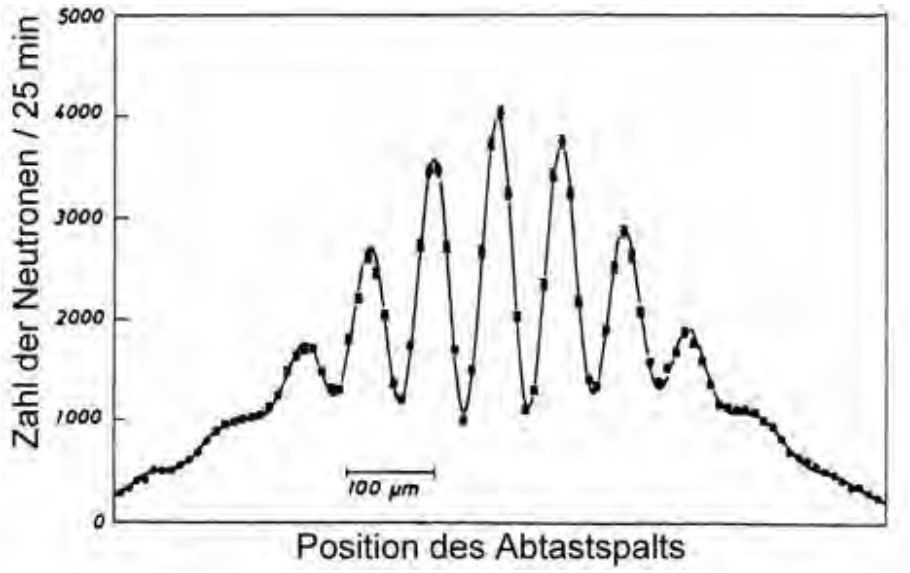


Abbildung 26: Neutroneninterferenz am Doppelspalt

## 6.5 Doppelspaltexperimente mit Helium-Atomen

Bis 1991 waren Neutronen die massivsten Quantenobjekte, für die Interferenz nachgewiesen werden konnte. Dann gelang es an der Universität Konstanz, ganze Heliumatome zur Interferenz zu bringen. das Experiment und seine Ergebnisse wurden im Abschnitt 2 bereits beschrieben.

## 6.6 Beugungsexperiment mit $C_{60}$-Molekülen

An der Universität Wien gelang es 1999 der Gruppe von Anton Zeilinger, die Grenze der Quantenwelt noch ein Stück weiter zu verschieben (Arndt et al. 1999). Sie beobachteten ein Interferenzmuster bei Fulleren-Molekülen. Dabei handelt es sich um fußballförmige Moleküle, von denen jedes aus 60 Kohlenstoffatomen besteht. Die Moleküle wurden an einem Beugungsgitter mit einer Gitterkonstanten von 100 nm gebeugt.

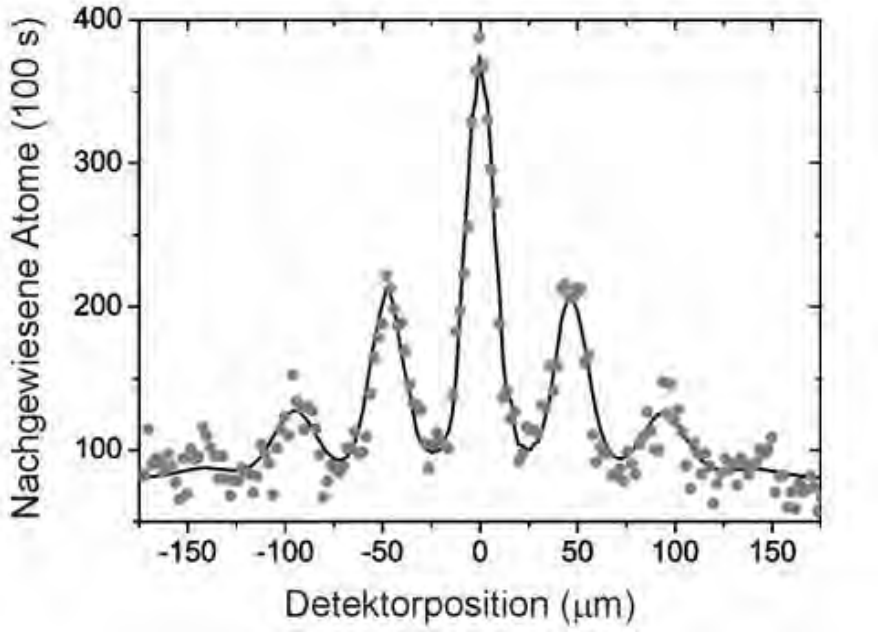


Abbildung 27: Beugungsbild von $C_{60}$-Molekülen an einem Gitter

Das experimentelle Ergebnis ist in Abb. 27 gezeigt. Man kann die Beugungsminima und -maxima deutlich erkennen. Das Bemerkenswerte an diesem Experiment ist, dass es die quantenphysikalische Interferenzfähigkeit auch „sehr großer“ Objekte demonstriert.

# 7 Interpretationen der Quantenphysik

## 7.1 Interpretation der Quantenmechanik als Unterrichtsinhalt?

Die Quantenmechanik widerspricht in ihren Grundaussagen eklatant den gewöhnlichen Anschauungen des Alltags. Wer die Ansätze eines wirklichen Verständisses der Quantenmechanik in der Schule vermitteln möchte, wird daher nicht darum herumkommen, sich auch mit Interpretationsfragen zu beschäftigen.

Vor dem Hintergrund der immer noch anhaltenden Debatte um die Deutung der Quantenmechanik stellt sich die Frage, ob die Beschäftigung mit derart komplexen und umstrittenen Themen im Unterricht überhaupt fruchtbar sein kann. Oder führt der Weg in eine Sackgasse und das Thema ist Schülerinnen und Schülern – noch dazu in der Sekundarstufe I – nicht zumutbar?

Um diese Frage zu beantworten, kann man die Expertise der Bund-Länder-Kommission zur Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts (BLK 1997) ansehen. Zur naturwissenschaftlichen Bildung heißt es dort: „Zum obligatorischen Wissensfundament gehört ferner ein hinreichend breites, in sich gut vernetztes sowie in unterschiedlichen Anwendungssituationen erprobtes Orientierungswissen in zentralen Wissensdomänen unserer Kultur, die unterschiedliche, nicht wechselseitig ersetzbare Horizonte des Weltverstehens erschließen. [...] Für junge Menschen, die keinen naturwissenschaftlich-technischen Beruf wählen, ist der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht in der Schule praktisch die einzige Chance zur systematischen Begegnung mit einem zentralen Teil unserer Kultur“ (BLK 1997, S. 12f).

Die Behandlung von Interpretationsfragen der Quantenmechanik kann also folgendermaßen legitimiert werden: Die Quantenmechanik hat neben der Relativitätstheorie wie keine andere Theorie das Weltbild der modernen Physik, unsere physikalische Kultur, geprägt und verändert. Dabei sind es gerade die Interpretationsfragen, die hier die entscheidende Rolle spielen: in der Relativitätstheorie Einsteins Analyse von Raum und Zeit; in der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeitsinterpretation und die Welle-Teilchen-Problematik. Physikalische Bildung beinhaltet nach dem oben Gesagten die Vertrautheit mit diesen fundamentalen Erkenntnissen, die die moderne Physik in unser Weltbild eingeprägt hat.

Gerade wenn man Inhalte der modernen Physik in der Sekundarstufe I unterrichten möchte, sollte man sich den Interpretationsaspekten nicht verschließen. In der Sekundarstufe I besteht noch die Chance, einem Großteil der Schülerinnen und Schüler die Begegnung mit diesem Teil unseres physikalischen Weltbilds zu ermöglichen. In der Oberstufe wird dagegen nur noch ein geringer Teil vom Physikunterricht erreicht.

## 7.2 Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

Im Unterricht erhebt sich die Frage, auf welche Interpretation der Quantenmechanik eingegangen werden soll. Im Gegensatz zur klassischen Mechanik gibt es in der Quantenmechanik eine Anzahl konkurrierender Interpretationsansätze.

Historisch sicherlich die wichtigste Deutung der Quantenmechanik ist die Kopenhagener Interpretation, die ab Mitte der zwanziger Jahre im Kreis um Niels Bohr entstand. Mit ihr lag erstmals eine abgeschlossene und in sich konsistente Interpretation des mathematischen Formalismus vor. Obwohl einige Physiker, wie etwa Einstein und Schrödinger ihr immer ablehnend gegenüberstanden und gerade Einstein immer neue Einwände gegen sie vorbrachte, konnte Bohr doch immer seine Position verteidigen und fand zahlreiche Anhänger.

Heutzutage gibt es nur noch wenige Physiker, die die ursprünglichen Ideen Bohrs vertreten. Die Kopenhagener Interpretation ist daher hauptsächlich von historischem Interesse. Doch insbesondere in populärwissenschaftlichen Texten werden die Argumente Bohrs oft benutzt. Kaum einmal wird jedoch seine Auffassung vollständig und im Zusammenhang wiedergegeben, oft verkürzt und missverständlich. Aber selbst die Lektüre der Bohrschen Originalarbeiten führt meist nicht zur erhofften Klarheit, da Bohrs Terminologie vielen Begriffen eine eigene, eng umrissene Bedeutung verleiht und sein Schreibstil sehr dicht und zum Teil wenig verständlich ist.

Als Grundkonzepte der Bohrschen Interpretation kann man die folgenden Ideen betrachten.

a) die Unverzichtbarkeit klassischer Begriffe,

b) der Begriff der Komplementarität und

c) die Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene.

Eine ausführliche Erläuterung dieser Begriffe und der zugrundeliegenden Ideen findet man in Müller (2003). Da die Kopenhagener Interpretation einen sehr „philosophischen“ bzw. „geisteswissenschaftlichen“ Charakter besitzt, ist eine ernsthafte Beschäftigung mit ihr sehr stark an die Originaltexte gebunden. Damit kommt aber wegen der sehr großen sprachlichen Komplexität der Texte Bohrs ein näheres Eingehen auf seine Interpretation in der Sekundarstufe I kaum in Frage.

## 7.3 Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik

Die Kopenhagener Interpretation galt lange Zeit als die Standardinterpretation der Quantenmechanik. Heutzutage können sich wohl die meisten Physiker – trotz großer individueller Unterschiede in den Interpretationen – mit der *Statistischen* oder *Ensembleinterpretation* auf eine Art „Minimalkonsens“ einigen.

Die Aussage der Ensemble-Interpretation lässt sich im Grunde zusammenfassen in dem Satz: „Die statistischen Aussagen der Quantenmechanik beziehen sich nicht auf ein Einzelsystem, sondern auf ein statistisches Ensemble von identisch präparierten Systemen.“

Die historischen Wurzeln der Ensemble-Interpretation lassen sich bis auf die berühmte Bohr-Einstein-Debatte 1927 zurückverfolgen. Einstein betrachtete das folgende Gedankenexperiment (Abb. 28): Ein Strahl von Elektronen trifft senkrecht auf

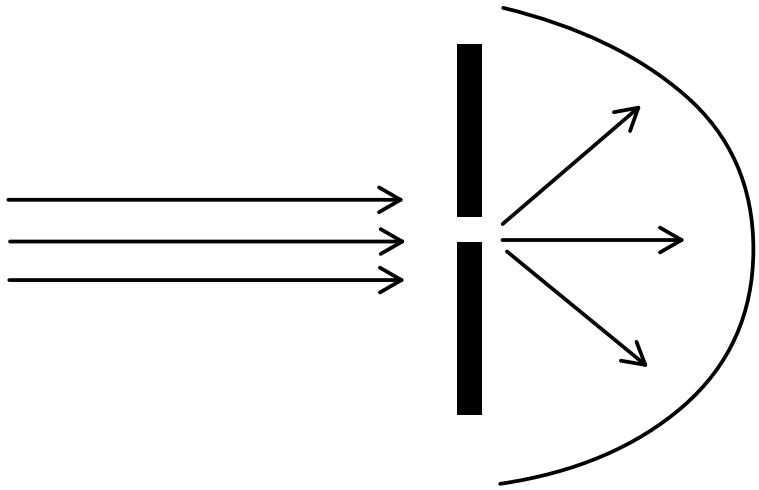

Abbildung 28: Gedankenexperiment von Einstein

einen Schirm mit einer kleinen Öffnung, hinter dem ein halbkugelförmiger fotografischer Film angebracht ist. Die zum Strahl gehörige Wellenfunktion wird am Spalt in eine Kugelwelle gestreut. Damit ist auf der Photofläche kein Punkt vor dem anderen bevorzugt. Er unterschied dann zwei mögliche Sichtweisen (Einstein 1928, zit. nach Ballentine 1972):

1. „Die de-Broglie-Schrödinger-Wellen entsprechen nicht einem einzelnen Elektron, sondern einer im Raum ausgedehnten Elektronenwolke. Die Theorie gibt keine Information über die individuellen Prozesse, sondern nur über das Ensemble einer Unendlichkeit von Elementarprozessen."

2. „Die Theorie hat den Anspruch, eine vollständige Theorie individueller Prozesse zu sein."

Nach dem ersten Standpunkt, der dem Grundgedanken der Ensemble-Interpretation nahekommt, ist $|\psi|^2$ ein rein statistisches Maß für die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron des Ensembles an der betrachteten Stelle anzutreffen. Die zweite Auffassung wurde von Bohr vertreten und von Einstein scharf abgelehnt. Sein Argument dagegen stützt sich darauf, dass nach dieser Deutung $|\psi|^2$ die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, *ein und dasselbe Teilchen* an einer bestimmten Stelle zu finden. Deshalb sollte es möglich sein, dasselbe Teilchen an zwei oder mehreren Stellen auf dem Film nachzuweisen. Diese Schlussfolgerung, die im Widerspruch zum experimentell beobachteten Verhalten von Elektronen steht, lässt sich nur dann vermeiden, wenn es einen Mechanismus gibt, der verhindert, dass ein Elektron an mehreren Stellen auf dem Film Spuren hinterlässt. Dieser Prozess, der später die „Reduktion der Wellenfunktion" genannt wurde und dafür sorgt, dass die Wellenfunktion bei einer Messung auf einen Punkt zusammengezogen wird (vgl. Wesenszug 3), stellt nach Auffassung Einsteins eine instantane Fernwirkung dar und ist daher mit der speziellen Relativitätstheorie nicht verträglich.

### 7.3.1 Ensemble, Präparation, Messung und Zustand

In der Ensemble-Interpretation wird der Unterschied zwischen den Begriffen „Präparation“ und „Messung“ besonders betont (obwohl diese Unterscheidung auch für die anderen Deutungen nützlich ist). Worum es sich dabei handelt, ist eigentlich recht einleuchtend. Da aber vor allem der Begriff der Messung in der Literatur in recht verwirrender Bedeutungsvielfalt gebraucht wird, soll anhand eines hypothetischen Experiments eine Illustration gegeben werden. Betrachten wir den in Abb. 29 gezeigten Versuchsaufbau: Aus einem Ofen kommt ein Strahl von Atomen, der einen Geschwindigkeitsselektor (z. B. eine Chopperanordnung) durchquert, damit alle Atome eine einheitliche kinetische Energie besitzen. Der Atomstrahl trifft auf einen Doppelspalt und wird von ihm gebeugt. Schließlich werden die Atome von einer Detektoranordnung registriert, von der wir annehmen, dass sie den Auftreffpunkt eines Atoms mit hinreichender Genauigkeit feststellen kann.

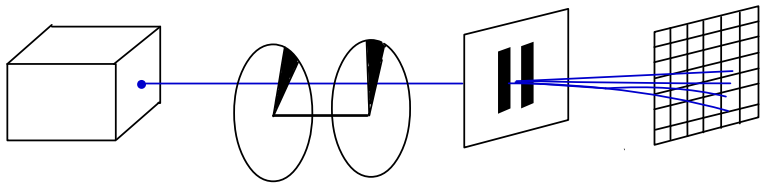

Abbildung 29: Versuchsanordnung zur Verdeutlichung von „Präparation“ und „Messung“.

Die Apparate vor dem Doppelspalt dienen dazu, einen einheitlichen Anfangszustand $\psi(x, t = 0)$ der Atome herzustellen. Man sagt, dass der Zustand *präpariert* wird. In unserem Beispiel liefert der Ofen eine breite Geschwindigkeitsverteilung, die durch den Selektor auf einen schmalen Bereich eingeschränkt wird (idealerweise auf *einen* bestimmten Wert). Der präparierte Anfangszustand besitzt dann (näherungsweise) eine feste longitudinale Geschwindigkeit (bzw. kinetische Energie).

Generell versteht man unter einem *Präparationsverfahren* eine experimentelle Anordnung, die es in reproduzierbarerer Weise erlaubt, den gewünschten Anfangszustand eines quantenmechanischen Systems zu erzeugen (Ballentine 1998).

Wie schon im Zusammenhang mit Wesenszug 1 dargelegt, ist einer der Grundzüge der Quantenmechanik, dass selbst eine vollständige Präparation das Ergebnis einer nachfolgenden Einzelmessung nicht festlegt, sondern nur die *Wahrscheinlichkeiten* bzw. die *Häufigkeitsverteilungen* der möglichen Ereignisse. In unserem Beispiel werden zwei Atome, die unter identischen Bedingungen präpariert worden sind, nach der Flugzeit $T$ im Allgemeinen an verschiedenen Stellen auf dem Detektorschirm auftreffen. Die Häufigkeitsverteilung ist durch $|\psi(x, t = T)|^2$ gegeben.

Generell legt eine Präparation die Häufigkeitsverteilungen aller messbaren Größen fest. Sie charakterisieren den Zustand des Systems vollständig (und dies ist die eigentliche Grundlage des Zustandsbegriffes). Zwei Präparationsverfahren sind dann

äquivalent (d. h. sie liefern den gleichen Zustand), wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für alle möglichen Messungen übereinstimmen.

Nachdem die Präparation an unserem physikalischen System durchgeführt wurde und es die Experimentier-Anordnung passiert hat, muss es nachgewiesen werden, damit man ein experimentelles Ergebnis erhält. Dieser Teil des Experiments ist die *Messung*. Im Beispiel oben treffen die Atome nach dem Doppelspalt auf den Detektorschirm. Man interessiert sich für die Ortsverteilung der Atome und führt deshalb eine Ortsmessung durch. Bei einer Messung wird der Zustand des gemessenen Objekts gewöhnlich stark geändert; Mikroobjekte wie Elektronen, Atome oder Photonen werden meist ganz absorbiert. Für den Erfolg der Messung spielt das aber keine Rolle. Es muss betont werden, dass die Messung von der Präparation logisch unabhängig ist. So könnte man in unserem Beispiel statt dem Ort der Atome ihre Impulsverteilung messen, ohne dass sich deshalb an der Präparationsprozedur etwas ändern müsste. Lediglich die Messapparate müssten ausgetauscht werden.

Es wurde schon festgestellt, dass ein Präparationsverfahren nicht das Ergebnis von Einzelmessungen festlegt, sondern die Häufigkeitsverteilungen. Deshalb argumentieren die Anhänger der Statistischen Deutung, dass sich Begriffe wie „Präparation“ oder „Zustand“ nicht auf ein Einzelobjekt beziehen können, sondern nur auf ein *Ensemble* von unter identischen makroskopischen Bedingungen präparierten Quantenobjekten. Der Begriff des Ensembles (auch „Gesamtheit“ genannt) ist aus der statistischen Mechanik bekannt und bezeichnet die unendliche Menge aller Einzelrealisierungen, die aus einem bestimmten Präparationsverfahren resultieren kann. Um den Begriff des Ensembles anhand unseres Gedankenexperimentes zu verdeutlichen, ist es wichtig, dass damit nicht der Atomstrahl aus vielen miteinander wechselwirkenden Atomen gemeint ist, sondern eine gedachte Wiederholung desselben Experiments in vielen Einzelversuchen mit einzelnen Atomen. Ein Atomstrahl repräsentiert nur dann ein Ensemble, wenn er so schwach ist, dass zu jeder Zeit nur ein Teilchen die Apparatur durchquert bzw. die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Atomen vernachlässigt werden kann.

### 7.3.2 Formulierung der Ensemble-Interpretation

Nach dieser begrifflichen Präzisierung der grundlegenden Konzepte können wir die Grundgedanken der Ensemble-Interpretation formulieren:

1. *Die Quantenmechanik macht keine Vorhersagen über das Ergebnis eines einzelnen Experimentes* (außer in den trivialen Fällen in denen für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses 0 oder 1 berechnet wird).

2. *Die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantenmechanik beziehen sich auf wiederholte Messungen, die an einem Ensemble von identisch präparierten Systemen durchgeführt werden.*

3. *Der empirische Gehalt einer Wahrscheinlichkeitsaussage wird überprüft, indem man ein Experiment viele Male wiederholt und die relativen Häufigkeiten der einzelnen Ereignisse ermittelt.*

### 7.3.3 Die Ensemble-Interpretation und die Unbestimmtheitsrelation

In der Ensemble-Interpretation ist die Formulierung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \tag{1}$$

in begrifflich besonders klarer Weise möglich. Die Größen $\Delta x$ und $\Delta p$ werden als Standardabweichungen in der statistischen Verteilung von Messwerten angesehen (was auch durch die theoretischen Ausdrücke, die bei der Ableitung von (1) auftauchen, nahegelegt wird).

Die operationale Bedeutung der Relation wird folgendermaßen gesehen: An einem statistischen Ensemble von gleich präparierten Systemen führt man die gleiche Messung (z. B. des Ortes) viele Male hintereinander aus. Die so gewonnenen Messwerte wertet man statistisch aus (z. B. indem man wie in Abb. 30 ein Histogramm anfertigt und den Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung $\Delta x$ berechnet). Das gleiche Verfahren wird an einem genauso präparierten Ensemble für die Messung des Impulses wiederholt. Aus der Verteilung der Messwerte ergeben sich $\bar{p}$ und $\Delta p$. Für das Produkt der beiden Standardabweichungen gilt die Ungleichung (1).

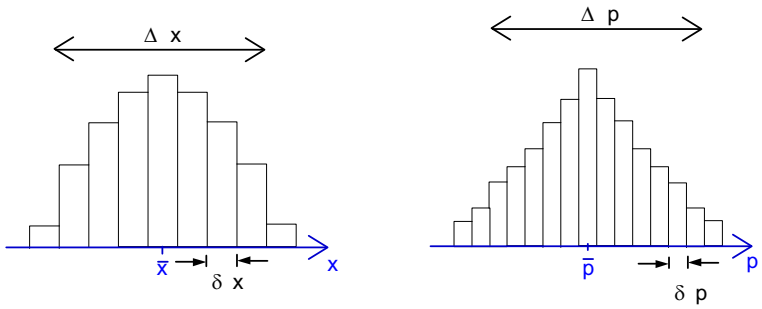


Abbildung 30: Messfehler und Standardabweichungen für Ort und Impuls.

Um Missverständnissen vorzubeugen, müssen einige Punkte betont werden:

1. Die Größen $\Delta x$ und $\Delta p$ sind nicht als Ungenauigkeiten der Messung zu interpretieren. Um eine statistische Verteilung zu gewinnen, müssen die Messfehler $\delta x$ und $\delta p$ der Einzelmessungen sehr viel kleiner als die Streuungen sein, wie in Abb. 30 illustriert.

2. Das hier geschilderte experimentelle Verfahren verlangt nicht die Messung von Ort und Impuls am gleichen Einzelsystem. Die Erklärung, wonach die Relation (1) auf die gegenseitige Störung gleichzeitiger Messungen zurückzuführen sei,

ist nicht haltbar. Sie würde nahelegen, dass dem ungestörten Einzelsystem zu jedem Zeitpunkt eine Orts- und Impulseigenschaft zukommt, wie den Teilchen eines klassischen Gases.

3. Die Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf das Einzelsystem, sondern auf den Zustand, d. h. das in einer bestimmten Weise präparierte Ensemble.

Man kann die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelationen in der Ensemble-Interpretation auch folgendermaßen formulieren: Es ist nicht möglich, eine Gesamtheit von Quantenobjekten in einen Zustand $\psi$ so zu präparieren, dass $\Delta x \Delta p < \hbar/2$ für diese Gesamtheit erfüllt ist.

# 8 Schülervorstellungen zur Quantenphysik

Seit über zwanzig Jahren ist man sich der Bedeutung von Schülervorstellungen für den Lernprozess bewusst (für einen allgemeinen Überblick über Schülervorstellungen in der Physik s. Müller, Wodzinski & Hopf 2004). Moderne Ansätze zur Vermittlung der Quantenphysik sollten sich nicht nur an der Sachstruktur der Inhalte orientieren, sondern auch die Lernenden – Schülerinnen und Schüler – als zentrales Objekt des Lernprozesses berücksichtigen.

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die typischen Vorstellungen gegeben werden, von denen man erwarten kann, dass sie die Schülerinnen und Schüler mit in den Unterricht bringen oder im Lauf des Unterrichts entwickeln. Das Berücksichtigen dieser Vorstellungen bei der Entwicklung von Unterricht kann zu effektiverem Unterricht beitragen.

Leider gibt es nur eine sehr überschaubare Anzahl von Untersuchungen zu Schülervorstellungen in der Quantenphysik. Diese unterscheiden sich noch dazu stark hinsichtlich der Anlage der Untersuchung, der Fragestellungen und der untersuchten Schülergruppen. Bis auf ganz pauschale Aussagen („Schüler stellen sich Quantenobjekte mit klassischen Bildern vor. Sie haben Vorstellungen vom Atom, die dem Rutherfordschen oder Bohrschen Atommodell entsprechen“) kann man daher kein einheitliches Bild der Ergebnisse dieser Untersuchungen zeichnen.

Im Folgenden werden daher ausgewählte Aspekte der einzelnen Untersuchungen dargestellt, wobei die Anlage der jeweiligen Untersuchung kurz beschrieben wird.

## 8.1 Die Untersuchung von Bethge

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“

- **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 Betghe fordern einige Schüler „zum Verständnis von vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen [...] eine kausale Erklärung für die Entstehung dieser Verteilungen auf der Grundlage von Einzelereignissen ein“ (Bethge 1992). 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 haftet 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 des Verbreitungsgrades dieses Voverständnis-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 ih-

nen 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 den 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.

## 8.2 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 (vgl. Wiesner 1989, 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.

- **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%).

- **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 $p$ 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 Heisenbergschen 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 Quantenobjekten 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 Heisenbergschen 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 „Δ-Größen“ oftmals für kleine Werte: „$\Delta x$ ist – irgendwie klein.“

  *(v) Eingeschränkte Definitionsmöglichkeit (4%)*
  Nach Wiesner (1996) finden sich Andeutungen der Bohrschen Auffassung nur bei einem einzelnen Schüler: „Das sind – das ist so ein Bereich, in dem das verschwimmt. 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 verschieden 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 anschließend 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) eingeordneten, interpretiert $\Delta x$ bzw. $\Delta p$ als Standardabweichungen. Diese begrifflich recht einfache Festlegung wurde demnach in keinem Kurs verwendet.

## 8.3 Die Untersuchung von Lichtfeldt und Fischler

Eine umfangreiche Untersuchung (25 Kurse) zu Schülervorstellungen über Quantenphysik wurde von Fischler und Lichtfeldt (1992a–c) im Zusammenhang mit der Evaluation des Berliner Unterrichtskonzepts durchgeführt. Im jetzigen Zusammenhang interessieren die allgemeinen Ergebnisse über Schülervorstellungen *vor* dem Unterricht.

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.

- **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 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 Vorstellungen bestätigt fänden und das eigentlich Neue der quantenphysikalischen Lichtbetrachtung nicht empfänden“ (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 Strukturformen 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 Vorstellung 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 Wissenselementen 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“.

# 9 Literatur


M. Arndt et al., *Wave-particle duality of $C_{60}$*, Nature 401, 680, 1999.

F. Bader, *Optik und Quantenphysik nach Feynmans QED*, Physik in der Schule **32** 250 (1994).

F. Bader, *Eine Quantenwelt ohne Dualismus*, Schroedel, Hannover (1996).

L. E. Ballentine, *Einstein's Interpretation of Quantum Mechanics*, Am. J. Phys. **40**, 1763 (1972).

L. E. Ballentine, *Quantum Mechanics – A Modern Development*, World Scientific, Singapore (1998).

A. Berg, H. Fischler, M. Lichtfeldt, M. Nitzsche, B. Richter, F. Walther, *Einführung in die Quantenphysik. Ein Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse*, Pädagogisches Zentrum Berlin (1989).

T. Bethge, *Empirische Untersuchungen zu Schülervorstellungen über Quantenphysik*, in: W. Kuhn (Hrsg.): *Didaktik der Physik*, Physikertagung Gießen (1988).

T. Bethge, *Schülervorstellungen zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik*, in H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN, Kiel (1992).

BLK (Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung), *Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts*, o. O. (1997).

A. Brachner, R. Fichtner, *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*, Schroedel, Hannover (1977).

A. Brachner, R. Fichtner, *Quantenmechanik*, Schroedel, Hannover (1980).

S. Deylitz, *Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*, Logos, Berlin (1999).

R. Duit, *Teilchen- und Atomvorstellungen*, in: R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis, Köln (2004).

A. Einstein, in: *Electrons et Photons*, Institut International du Physique Solvay, Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique, Paris (1928), S. 253.

R. Erb, *Optik in der Oberstufe*, Physik in der Schule **33**, 51 (1995).

R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III*, Addison-Wesley, Reading (1966).

R. P. Feynman, *QED – die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, München (1988).

R. Fichtner, *Das quantenmechanische Fundamentalprinzip*, physica didactica **7**, 17 (1980).

H. Fischler, *Anschaulichkeit oder Abstraktion – Grundlagen oder Anwendungen*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel, S. 6 (1992).

H. Fischler, M. Lichtfeldt, *Teilchen und Atome*, in: R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis, Köln (2004).

A. Gabriel, W.-D. Garber, *Einführung in die Quantenphysik: Mit Photonen oder mit Elektronen?*, Physik und Didaktik **9**, 189 (1981b).

R. Gähler, A. Zeilinger, Wellenoptische Experimente mit sehr kalten Neutronen, Physik und Didaktik 3, S. 217 (1994); übersetzt aus: American Journal of Physics 59, 1991, S. 316.

C. Jönsson, *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*, Z. Phys. 161, 454, 1961.

J. Küblbeck, *Modellbildung in der Physik*, hrsg. v. Landesinstitut für Erziehung und Unterricht Stuttgart (1997).

J. Küblbeck, R. Müller, *Die Wesenszüge der Quantenmechanik*, Aulis-Verlag, Köln (2002).

W. Kuhn, *Lehrbuch der Physik, Bd. II*, Westermann, Braunschweig, 1991.

W. Kuhn, *Quantenmechanik – Eine wissenschaftstheoretisch reflektierte Analyse ihres ideengeschichtlichen Entwicklungsprozesses*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN, Kiel, S. 29 (1992).

W. Kuhn, *Quantenphysik in der Schule?*, Physik in der Schule **32**, 257 (1994).

W. Kuhn, *Physik 2 – Grundkurse*, Westermann, Braunschweig (2000).

W. Kuhn, *Ideengeschichte der Physik. Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext*, Braunschweig (2001).

J. Leisen, *PZ-Information 2/2000 Quantenphysik / Mikroobjekte. Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II*, http://www.uni-koblenz.de/∼odsleis/lehrplan-physik/handreichungquanten.pdf

M. Lichtfeldt, *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*, Westarp, Essen (1992a).

M. Lichtfeldt, *Erprobungen der „Einführung in die Quantenphysik": Lernprozesse und Veränderungen von Vorstellungen*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel, S. 253 (1992b).

M. Lichtfeldt, *Schülervorstellungen als Voraussetzung für das Lernen der Quantenphysik*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel, S. 253 (1992c).

R. Müller, H. Wiesner, *Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation*, Physik in der Schule **35**, 179, 218 (1997a).

R. Müller, H. Wiesner, *Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation im Unterricht*, Physik in der Schule **35**, 380 (1997b).

R. Müller, H. Wiesner, *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*, Physik in der Schule 38 (2000), S. 126.

R. Müller, H. Wiesner, *Teaching Quantum Mechanics on an Introductory Level*, American Journal of Physics 70, 200 (2002).

R. Müller, *Quantenphysik in der Schule*, Logos-Verlag Berlin (2003).

R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf, *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis, Köln (2004).

H. Niedderer, *Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel (1992), S. 88.

V. Pietzner, *Atommodelle im Chemieunterricht der SI*, Praxis der Naturwissenschaften/ Physik in der Schule, Heft 3/54, S. 2 (2005).

G. Sauer, *Didaktische Aspekte der Bohrschen Atomtheorie*, in: H. Fischler (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*, IPN Kiel, S. 6 (1992).

L. Schön, J. Werner, *Vom Licht zum Atom*, in: R. Brechel (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie (GDCP-Tagung Essen) 304 (1998).

E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwiss. **23**, 807, 823, 844 (1935).

J. Singh, *Quantum Mechanics – Fundamentals and Applications to Technology*, Wiley, New York (1997).

J. Singh, *Modern Physics for Engineers*, Wiley, New York (1999).

G. I. Taylor, *Interference fringes with feeble light*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. XV, 114 (1910).

A. Tonomura et al., *Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*, American Journal of Physics 57, 117 (1989).

A. Weis, R. Wynands, *Three Demonstration Experiments On The Wave And Particle Nature Of Light*, PhyDid 1/2 (2003) S.67-73, http://www.phydid.de/beitraege/ WeisWynands_PhyDid_1_2003.pdf

H. Wiesner, *Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe*, Westarp Verlag, Essen (1989).

H. Wiesner, *Verständnisse von Leistungskursschülern über Quantenphysik. Ergebnisse mündlicher Befragungen*, Physik in der Schule **34**, 95 (1996).

D. Zollman, *Visual Quantum Mechanics*, unveröffentliches Manuskript (1998).

D. Zollman (Hrsg.), *Research on Teaching and Learning in Quantum Mechanics*, Papers presented at the annual meeting National Association for Research in Science Teaching (1999). Erhältlich unter: http://www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst/.