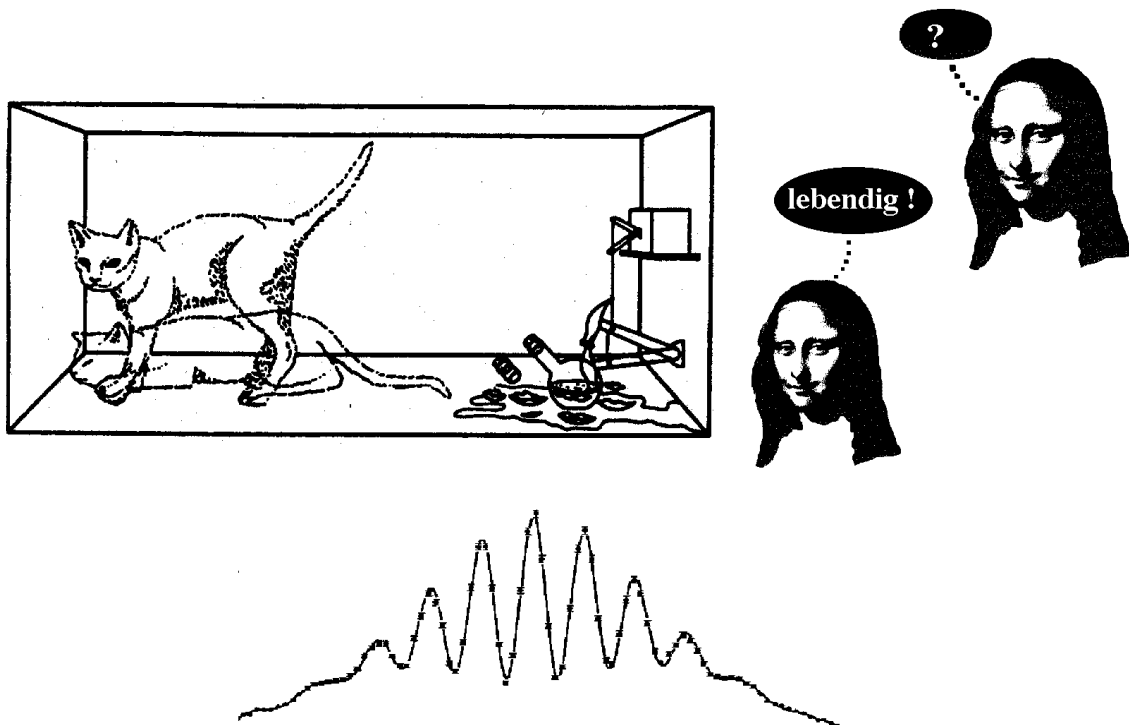


Es spukt also doch bei den Quanten ...

Ein Leitprogramm zur Quantenphysik



Verfasst von: Pierre Mandrin, Hans Peter Dreyer

Herausgegeben von: Fachdidaktik Physik ETH

Es spukt also doch bei den Quanten ...

Ein Leitprogramm zur Quantenphysik

Stufe, Schulbereich:	Gymnasien Klassen 11-13, Fachhochschulen;
Fachliche Vorkenntnisse:	Kinematik, Impulserhaltung Elektrisches und magnetisches Feld Elektromagnetismus Elektron, Proton, Neutron Wellenlänge Beugung, Interferenz von Wellen Begriff des Quantenobjekts Unbestimmtheitsbeziehung qualitativ (Ort / Impuls)
Bearbeitungsdauer:	Kapitel 1-2: 4-6 Lektionen Kapitel 3: 2 Lektionen
Verfasst von:	Pierre Mandrin, Hans Peter Dreyer
Herausgegeben von:	Fachdidaktik Physik ETH
Version:	Dezember 2002

Dank

Ein herzlicher Dank gilt Herrn W. Pils und M. Berta, Winterthur, für die Erprobung und für manche hilfreiche Ratschläge und nützliche Hinweise für dieses Leitprogramm.

Einführung

Viele Naturerscheinungen können *nur* mit Hilfe der *Quantentheorie* erklärt werden. Diese Theorie hat sich im Laufe des 20. Jahrhunderts gut bewährt. Sie wurde durch unzählige Experimente *bestätigt*. Zudem werden Quanteneffekte immer häufiger in der Technik verwendet, vom Laser bis zum Mikroskop.

Allerdings überfordern die Quanten unser *alltägliches Vorstellungsvermögen*. Es lohnt sich deshalb, die Quanten besser kennenzulernen.

Schon im Kapitel 1 werden Sie ein seltsames Gefühl bekommen. Erwarten Sie winzig kleine *Quanten* wie die Elektronen? Vorsicht! Auch *grössere Objekte* wie Atome verhalten sich in Experimenten bereits so. Und wer weiss, wie gross die Versuchsobjekte noch werden können...

Hie und da werden Quanten wie "*Gespenster*" ihren "*Spuk*" in unerreichbarer Ferne treiben. Mehr dazu im Kapitel 2.

Im Kapitel 3 wird es noch erstaunlicher. Jeder Beobachter "*erschafft*" das Teilchen, das er messen will! Hier nähern wir uns dem Gebiet der *Philosophie*.

Nach der Bearbeitung dieses Leitprogramms sind Sie in der Lage, die wichtigsten Debatten des Quanten-Zeitalters zu beschreiben und zu interpretieren.

Inhaltsverzeichnis

Einführung		3
Inhaltsverzeichnis		4
Arbeitsanleitung		5
Kapitel 1	Wie gross kann ein Quantenobjekt sein?	6
1.1	Experimente mit grossen Quanten	7
1.1.1	Ein Experiment mit Neutronen	8
1.1.2	Ein Experiment mit Atomen	10
1.2	Was sind Quantenobjekte nun wirklich?	12
Kapitel 2	Spukhafte Fernwirkungen	19
2.1	Ein Gedankenexperiment	20
2.1.1	Einstein gegen die Quantentheorie	21
2.1.2	Die Quantentheorie verteidigt sich	22
2.2	Und was meint die Natur?	23
Kapitel 3	Tot oder lebendig?	35
3.1	Vom Messprozess zum Katzendrama	36
3.2	Verschiedene Interpretationen	40
Anhänge		
Anhang 1	Tests und Lösungen	45
Anhang 2	Bibliothek für die Schüler	53
Anhang 3	Experimentiermaterial und Computer-Simulationen	54
Anhang 4	Von den Autoren benutzte Quellen	58
Anhang 5	Hinweise für die Lehrperson	59

Arbeitsanleitung

Das vorliegende Leitprogramm bearbeiten Sie ganz für sich und nach Ihrem *eigenen Tempo*. Alle Kapitel sind in der gleichen Form aufgebaut. Am Anfang befinden sich jeweils eine *Übersicht* und die *Lernziele*. Dann kommt der eigentliche Stoff. Während der Lektüre treffen Sie einige *Aufgaben* an. Nachdem Sie eine Aufgabe bearbeitet haben, können Sie am Schluss des jeweiligen Kapitels die *Lösung* nachschauen. Bei Schwierigkeiten finden Sie dort Hilfe in *Schrägschrift*.

Von den drei Kapiteln bearbeiten Sie zunächst die ersten beiden. Am Ende des jeweiligen Kapitels müssen Sie einen *Kapiteltest* bestehen. Für diesen Test melden Sie sich beim Lehrer, oder bei einem von ihm bestimmten Tutor. *Erst danach* können Sie das nächste Kapitel in Angriff nehmen. Vor dem Kapiteltest können Sie anhand einer *Lernkontrolle* nochmals überprüfen, ob Sie das Kapitel *verstanden* haben.

Wie geht es nachher weiter?

Versuchen Sie mit der verbleibenden Zeit, das *dritte Kapitel* zu bearbeiten. Es gehört zwar nicht zum obligatorischen Stoff. Doch werden Sie sich von den spannenden philosophischen Fragen sicher angesprochen fühlen.

1 Wie gross kann ein Quantenobjekt sein?

Übersicht und Lernziele von Kapitel 1	6
1.1 Experimente mit grossen Quanten	7
1.1.1 Ein Experiment mit Neutronen	8
1.1.2 Ein Experiment mit Atomen	10
1.2 Was sind Quantenobjekte nun wirklich?	12
Lernkontrolle	14
Lösungen zu den Aufgaben	15

Übersicht

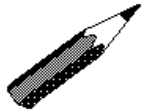
Meistens begegnet man *sehr kleinen* Quantenobjekten, wie Photonen oder Elektronen. Diese Objekte sind so klein, dass wir uns von ihren merkwürdigen Eigenschaften kaum beeindrucken lassen. Grössere Objekte besitzen *grössere Massen*. Dadurch haben diese Objekte oft schon so *grosse Impulse*, dass sie sich kaum mehr wie Quantenobjekte verhalten. Vor Kurzem wurden jedoch Experimente mit "*gigantischen*" *Quantenobjekten* realisiert. Grund genug, sich mit grossen *Quanten* zu beschäftigen!

Lernziele von Kapitel 1

- Sie können eine *ausführliche Antwort* zur folgenden Frage geben:
Treten beliebig *grosse Objekte* gleichzeitig durch *zwei Spalte* hindurch?
- Sie können zwei *Experimente* mit grossen Quanten Ihrer Nachbarin oder Ihrem Nachbarn erläutern.
- Sie können das *Wesen* der Quantenobjekte anhand von Beispielen *interpretieren*.

1.1 Experimente mit grossen Quanten

Bevor wir zur Betrachtung grosser Quantenobjekte übergehen, kommen wir auf die *Grundeigenschaften* von Quantenobjekten zurück. Mit der folgenden Aufgabe können Sie Ihr Gedächtnis auffrischen.



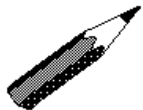
Aufgabe 1.1: Was ist ein Quantenobjekt?

Quantenobjekte sind durch *zwei Grundeigenschaften* definiert. Je nach *Situation* tritt die eine oder die andere in Erscheinung.

Geben Sie diese *Grundeigenschaften* an.

In diesem Kapitel benötigen Sie ebenfalls einige Kenntnisse aus der Wellenlehre. Das Nötigste können Sie bei der nachfolgenden Aufgabe nochmals auffrischen.

Falls Sie sich nicht an alle Einzelheiten erinnern können und die Frage deswegen nicht beantworten können, lesen Sie die *Lösung* sorgfältig durch. Dort steht alles, was Sie zu wissen brauchen.



Aufgabe 1.2: Wellen

Mit welchem *Experiment* kann man das typische Verhalten einer *Welle* nachweisen? Der Nachweis soll einfach sein und für beliebige Wellen funktionieren.

Woran stellt man bei diesem Experiment fest, ob es sich um eine Welle handeln muss?

Haben Sie dieses Experiment gründlich verstanden? Dann können Sie die Simulation 1.1 *überspringen* und mit dem nachfolgenden Text fortfahren.

Wenn Sie aber noch Mühe mit dem Thema "*Interferenzen*" haben und lieber nochmals ein *Experiment* dazu sehen möchten, sehen Sie sich die Simulation 1.1 an.



Simulation 1.1: Interferenzen am Doppelspalt

Gehen Sie zum bereitgestellten *Computer* und starten Sie das Simulationsprogramm.

Halten Sie Ihre Beobachtung fest. Wie ändert sich das Interferenzbild, wenn Sie den *Abstand zwischen den Spalten* verändern?

Wenn Sie Probleme haben, hilft Ihnen der Tutor.

Auch *Quantenobjekte* zeigen *Wellennatur*.

Der französische Physiker **Louis de Broglie** hat 1924 eine allgemeine Beziehung zwischen der Wellenlänge λ und dem Impuls p beliebiger Quantenobjekte gefunden (*Beziehung von de Broglie*):

$$\lambda = \frac{h}{p} .$$

Je *grösser* der Impuls, desto *kleiner* die Wellenlänge. Die Konstante h heisst *Planck'sches Wirkungsquantum*:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}.$$

Wie kann man zeigen, dass sich ein Teilchen wie ein *Quantenobjekt* verhält? Dazu wird zum Beispiel ein Teilchen nach dem anderen durch einen *Doppelspalt* geschickt und daran wie Licht *gebeugt*. So entsteht ein *Interferenzmuster*. Interferenzen gibt es schon für *ein Einzelteilchen*.

Haben Sie so etwas in einem *Experiment* schon gesehen? Dann können Sie die Simulation 1.2 *überspringen* und direkt weiterlesen. Sonst probieren Sie die Simulation 1.2 aus. Sie ist freiwillig.



Simulation 1.2: Interferenzen mit Elektronen

Gehen Sie zum bereitgestellten *Computer* und starten Sie das Simulationsprogramm.

Halten Sie Ihre Beobachtung fest. Wie ändert sich das Interferenzbild, wenn Sie den *Abstand zwischen den Spalten* verändern?

In dieser Simulation können Sie auch *mehr oder weniger Elektronen* pro Sekunde abfeuern.

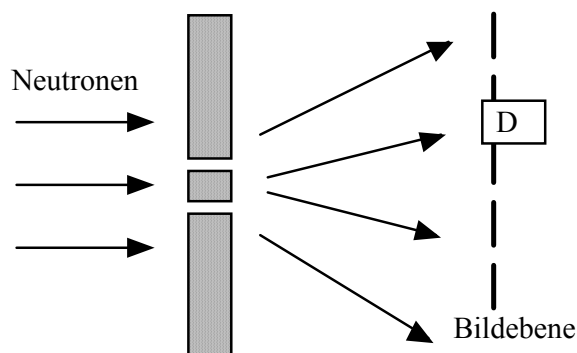
Wenn Sie Probleme haben, hilft Ihnen der Tutor.

Anton Zeilinger aus Wien hat Experimente mit grossen Quantenobjekten beschrieben (Audretsch 90). Wir betrachten hier *zwei* davon.

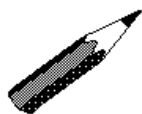
1.1.1 Ein Experiment mit Neutronen

Im *ersten Experiment* werden *Neutronen* untersucht. Damit die *Interferenzen* gut sichtbar sind, darf in diesem Experiment der Abstand zwischen den Spalten nicht viel grösser als 0.1 mm sein. Für den Doppelspalt verwendet man ein spezielles Glas und Metall (Bor). Das sind Materialien, welche die Neutronen verschlucken (sogenannte *Neutronenabsorber*).

Mit einem *Neutronendetektor* (Nachweisgerät) kann man nachweisen, dass ein Neutron an einem bestimmten Ort ankommt. Der Detektor bleibt während einer bestimmten Zeit am gleichen Ort. Man bestimmt die Anzahl angekommener Neutronen pro Zeiteinheit (*Intensität*). Die Intensität wird an verschiedenen Orten entlang der *Bildebene* gemessen (siehe Figur 1.1). Damit findet man, wie die Intensität vom Ort abhängt (*Intensitätsverteilung*). Nach diesem Prinzip findet man heraus, ob die Neutronen ein *Interferenzmuster* bilden.



Figur 1.1: Prinzipskizze des *Doppelspaltexperiments für Neutronen*. Der *Neutronendetektor* (D) lässt sich entlang der *Bildebene* verschieben.



Aufgabe 1.3: "Langsame" Neutronen

Im obigen *Neutronenexperiment* ist der *Abstand zwischen den Spalten* von der Grössenordnung 0.1 mm. Damit man Interferenzen beobachten kann, soll dieser Abstand *höchstens* etwa 10^5 mal grösser sein als die *Wellenlänge* λ .

Wie gross darf die *Geschwindigkeit* der Neutronen *maximal* sein? (Eine grobe Schätzung genügt.)

Neutronen haben eine Masse von $1.67 \cdot 10^{-27}$ kg.

In der folgenden Aufgabe geht es um die *Interpretation* des Neutronenexperiments (nach Zeilinger).



Aufgabe 1.4: Interferenzen mit Neutronen

Hier benötigen Sie einen (kopierten) Ausschnitt aus dem Buch von **J. Audretsch und K. Mainzer**, "*Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?*", BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1990. Es handelt sich um einen Beitrag von *Anton Zeilinger*, "Fundamentale Experimente mit Materiewellen und deren Interpretation". Lesen Sie von **Seite 73 bis 75 oben** ("*... ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist.*").

Notieren Sie sich danach *einige Stichworte* zur folgenden Frage:

Sie wollen eine *Welleneigenschaft* nachweisen. Wie muss sich die Intensitätsverteilung beim *Doppelspalt* von derjenigen beim *Einfachspalt* unterscheiden?

Das Interferenzbild ist zusätzlich in der Lösung abgebildet.

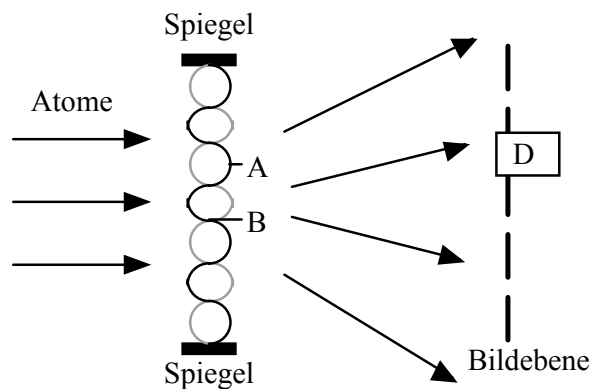
Die Neutronen sind nicht die *grössten Objekte*, an denen Welleneigenschaften beobachtet worden sind. Man hat sie sogar bei **Atomen** beobachtet. Prinzipiell gilt die Quantenphysik für *alle noch so grossen Objekte*, die in der Natur vorkommen.

1.1.2 Ein Experiment mit Atomen

Atome lassen sich sehr gut an *Gittern* beugen. Nach dem Namen des Entdeckers spricht man bei einer Beugung am Gitter auch von der *Bragg-Beugung*.

Wie realisiert man genügend *kleine Gitterabstände*? Hier hilft nur die menschliche Phantasie. Anstelle der üblichen (materiellen) Gitter kann man Gitter aus *Licht* herstellen. Das Grundprinzip wollen wir hier kurz anschauen.

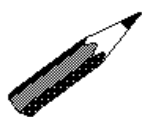
Das funktioniert wie eine Badewanne. Die Ränder der Wanne werfen die Wasserwellen zurück. So bildet sich eine *stehende Welle*. An gewissen Stellen bewegt sich das Wasser stark auf und ab, an anderen Stellen gar nicht. Genauso wird eine *stehende Lichtwelle* von zwei *Spiegeln* erzeugt. Auch das Licht schwingt an bestimmten Stellen mit *hoher Intensität*, an anderen Stellen dagegen nicht. Die "Bausteine" des Lichts (*Photonen*) häufen sich bei den Stellen mit hoher Intensität. So entsteht ein *Gitter aus Licht*. Die Figur 1.2 zeigt ein solches Gitter.



Figur 1.2: Prinzipskizze des *Interferenzexperiments für Natrium-Atome*. Als Beugungsgitter wird eine *stehende Lichtwelle* verwendet. An der Stelle A schwingt das Licht mit *grosser* Intensität, an der Stelle B hingegen *gar nicht*. Dies verdeutlichen *zwei "Momentaufnahmen"* (ausgezogene und punktierte Wellenlinie). An diesem *Lichtgitter* werden die Atome gebeugt. Ein *Detektor (D)* misst die *Verteilung* der ankommenden Atome in der Bildebene.

Mit Laserlicht erreicht man einen Gitterabstand von nur $0.295 \mu\text{m}$. Die *Natrium-Atome* haben eine Geschwindigkeit von 1 km/s . Bei diesen Werten lassen sich die Interferenzen gerade noch beobachten. In einer Distanz von 1.2 m nach dem Gitter wird schliesslich die *Verteilung* der Atome mit einem Detektor gemessen. Die Messanordnung finden Sie in der Figur 1.2.

Trotz der Grösse der Atome entsteht auch bei diesem Experiment ein *beeindruckendes Interferenzbild*. Dieses können Sie wiederum dem *Buch* von Audretsch und Mainzer entnehmen.



Aufgabe 1.5: Interferenzen mit Atomen

Auch hier benötigen Sie einen (kopierten) Ausschnitt aus dem Buch von **J. Audretsch und K. Mainzer**, "*Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?*", BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1990. Das Interferenzbild befindet sich im Beitrag von *Anton Zeilinger*, "*Fundamentale Experimente mit Materiewellen und deren Interpretation*", auf der **Seite 89**.

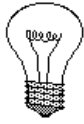
Betrachten Sie die *Abbildung 11* und lesen Sie die Angaben in der *Legende*. Notieren und skizzieren Sie für sich das dargestellte Messergebnis. Falls Sie sich an die Beugung an Gittern nicht mehr gut erinnern mögen, können Sie die Teilfigur c) auslassen.

Unterdessen haben sogar Experimente mit *Molekülen* stattgefunden (C_{60} , C_{70}). Forschungsergebnisse findet man auf der folgenden Internet-Seite:

www.quantum.univie.ac.at/research/index.shtml.

Die Objekte werden *immer grösser*. Ob es je eine Grenze geben wird, kann niemand sagen.

Jedenfalls können Sie sich getrost sagen: "*Der Physiklehrer wird mich noch lange nicht durch einen Doppelspalt schicken können.*"



Wir fassen zusammen:

Je nach den experimentellen Gegebenheiten verhält sich ein Quantenobjekt einmal wie ein *Teilchen*, ein andermal wie eine *Welle*. Selbst bei *grösseren Atomen* beobachtet man ein solches Verhalten. Allerdings wird es bei *zunehmender Masse* (und somit zunehmendem Impuls) immer *schwieriger*, die Wellennatur nachzuweisen, denn die *Wellenlänge* des Quantenobjektes wird immer *kleiner*:

$$\lambda = \frac{h}{p} .$$

Daher müssen Gitter mit immer *kleineren Gitterabständen* verwendet werden.

1.2 Was sind Quantenobjekte nun wirklich?

Die neuesten Experimente bringen uns in *Verlegenheit*. Wir spielen mit *Riesenquanten* und können uns darunter kaum etwas Vernünftiges *vorstellen*. Einmal verhält sich ein Quantenobjekt wie eine *Welle* und gleich danach wie ein *Teilchen*. Ein Atom macht einerseits *Interferenzen* mit sich selber und prallt andererseits wie ein *Stein* auf den Detektor. Wie müssen wir uns das vorstellen, wenn eines Tages ein *Stuhl* durch *zwei* Spalte hindurchfliegt?

Unser Problem: Wir suchen *Teilchen* dort, wo *Wellen* sind.

Das Problem löst sich mit der *folgenden Interpretation*.

Wir betrachten Lichtquanten (*Photonen*).

Eine Lampe erzeugt so viele Photonen, dass man das Licht auch mit der **klassischen Physik** beschreiben kann. Das wollen wir zunächst tun.

Licht wird von Elektronen erzeugt.

Eindrucksvoll ist das bei grossen Wellenlängen (*Radiowellen*). Wenn sich Elektronen in einem *Radiosender* bewegen, entsteht ein *elektrisches Feld* und ein *magnetisches Feld*. Beide Felder zusammen können sich vom Radiosender *loslösen* und breiten sich in Form von *Radiowellen* im Raum aus.

Diese Radiowellen kann man mit einer *Radioantenne* wieder empfangen. Man kann die Antenne an verschiedenen Orten aufstellen. Je nach *Empfangsort* bewegen sich die Elektronen der Antenne mehr oder weniger stark.

In der klassischen Physik beschreibt man also Licht oder Radiowellen mit *Feldern*. Diese Felder werden von einer Quelle oder einem Sender *erzeugt* und von einer "Antenne" *empfangen*.

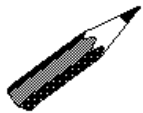
In der **Quantenphysik** ist das ganz ähnlich. Man muss aber die klassische Vorstellung *ein wenig* korrigieren.

Die Elektronen eines Radiosenders erzeugen nur *ganze "Portionen"* (Photonen). Auch empfängt eine Radioantenne nur *ganze "Portionen"*. Weil ein *einzelnes* Photon an *verschiedene Orte* gelangen kann, wird es von der Antenne nur mit einer gewissen *Wahrscheinlichkeit* empfangen. Zwischen dem Sender und dem Empfänger beansprucht das Photon den *ganzen vorhandenen Raum*.

Dadurch, dass *nur ganze "Portionen"* (Quanten) erzeugt und empfangen werden, ist der jeweilige Empfangsort *unbestimmt*.

Die obige *Interpretation* können wir auf *andere Quantenobjekte* wie Neutronen oder Atome übertragen.

Nun betrachten Sie nochmals das **Doppelspaltexperiment mit den Neutronen**.



Aufgabe 1.6: Ein Neutron im Doppelspalt

Betrachten Sie ein einzelnes Neutron im *Doppelspaltexperiment*.

- Welche Geräte spielen hier die Rollen des "*Senders*" und des "*Empfängers*"?
- Skizzieren* Sie die experimentelle Anordnung, etwa so wie in der Figur 1.1. *Markieren* Sie die Orte in der *Bildebene*, an denen das Neutron mit besonders *hoher Wahrscheinlichkeit* empfangen wird.
- Wodurch kommt die *Teilcheneigenschaft* des Neutrons zur Geltung?



Wir fassen zusammen:

Quantenobjekte sind weder Wellen noch Teilchen. Vielmehr breiten sie sich wie *Wellen* im Raum aus und werden wie *Teilchen* erzeugt oder verschluckt. Dieses Verhalten lässt sich mit Radiosendern und Radioempfängern veranschaulichen. Auch die Doppelspaltversuche lassen sich aus dieser Sicht betrachten.

Lernkontrolle



Aufgabe 1.7: Experiment mit Natrium-Atomen

In diesem Kapitel haben Sie ein *Interferenzexperiment mit Natrium-Atomen* kennengelernt. *Beschreiben* Sie es in etwa 3 Sätzen.



Aufgabe 1.8: Zaubermünzen

Sie möchten *2-Franken-Stücke* (je 10 g Masse) an einem *Doppelspalt* beugen. Sie werfen die Münzen mit 10 m/s auf den Doppelspalt. Wenn der Abstand zwischen den beiden Spalten *nicht mehr* als rund 10^5 mal die *Wellenlänge* einer Münze beträgt, könnten Sie im Prinzip *Interferenzen* beobachten. ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s)

- Wie gross darf der Abstand der Spalte *höchstens* sein?
- Ist dieser Wert mit *vernünftigen* Mitteln realisierbar? Eine kurze Begründung genügt.
(*Im Vergleich: Der Radius eines Protons beträgt etwa $1.2 \cdot 10^{-15}$ m.*)
- Das Experiment wird von *weiteren Eigenschaften* der Münzen wesentlich beeinflusst. Nennen Sie *eine* solche Eigenschaft.



Aufgabe 1.9: Tennisbälle

Tennisbälle scheinen ein *Teilchenverhalten* zu zeigen. Kann man sie trotzdem als "*grosse Quantenobjekte*" auffassen? *Begründen* Sie Ihre Antwort.

Wenn Sie alle drei Aufgaben erfolgreich gelöst haben und wenn Sie sich sicher fühlen, können Sie sich zum Kapiteltest melden.

Ansonsten sollten Sie zuerst diejenigen Stellen nochmals durchlesen, die Ihnen Mühe bereiten.

Lösungen zu den Aufgaben

Lösung 1.1: Was ist ein Quantenobjekt?

Je nach Situation hat ein Quantenobjekt *Teilcheneigenschaften* oder *Welleneigenschaften*.

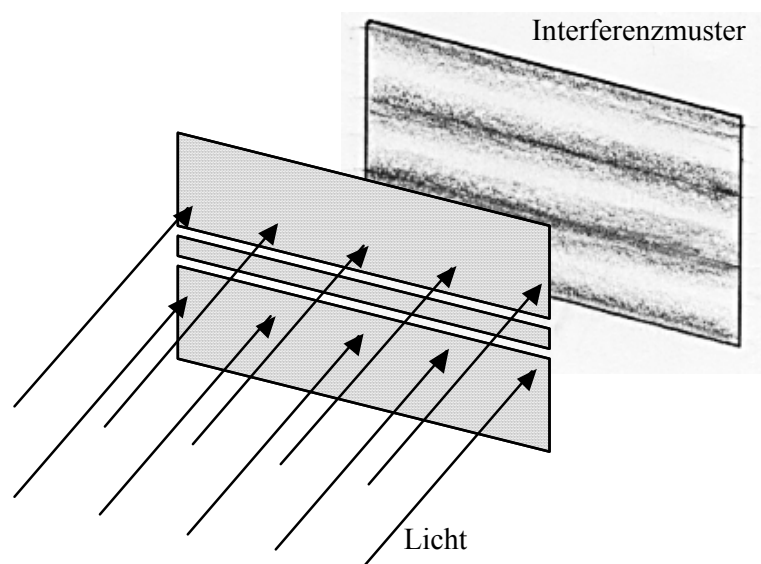
Falls Ihnen diese Grundeigenschaften nicht (mehr) vertraut sind, sollten Sie einen Blick in Ihre Unterlagen zu diesem Thema werfen.

Lösung 1.2: Wellen

Bestimmt erinnern Sie sich an ein Experiment über *Lichtwellen*. Eine undurchlässige Platte (oder Scheibe) mit *zwei* oder *mehreren Löchern* oder *Spalten* wurde von einem Lichtbündel *durchleuchtet*. Dahinter wurde das Licht auf einem weissen Schirm aufgefangen. Es bildete sich ein *regelmässiges Muster* von hellen und dunklen Streifen, ein sogenanntes *Interferenzmuster*. Bei den *hellen Streifen* überlagerten sich die Wellenberge (oder Wellentäler) beider Teilwellen und *verstärkten* sich. Bei den *dunklen Streifen* überlagerten sich die Wellenberge der einen mit den Wellentälern der anderen Teilwelle und *löschten* einander aus.

Ein Beispiel mit einem *Doppelspalt* ist in der Figur 1.3 dargestellt.

Wie beim Licht lassen sich bei *allen Wellen* Interferenzen nachweisen. Dazu muss man die vermeintlichen Objekte zum Beispiel durch einen *Doppelspalt* oder durch ein *Gitter* schicken. Dahinter werden die Objekte wiederum aufgefangen. Sie machen sich an bestimmten Orten *mehr*, an anderen *weniger* bemerkbar. Wenn man nun ein Interferenzmuster mit *Auslöschungen und Verstärkungen* antrifft (wie bei Lichtwellen), verhalten sich die Objekte wie Wellen. Die Interferenzen *verschwinden*, wenn man nur ein Loch (oder Spalt) offenlässt.



Figur 1.3: *Interferenzmuster am Doppelspalt.*

Lösung 1.3: "Langsame" Neutronen

Der Abstand d zwischen den Spalten darf höchstens etwa 10^5 mal grösser sein als die Wellenlänge λ . Also muss gelten: $\lambda \geq 10^{-9}$ m. Nun bekommt man aus der *Beziehung von de Broglie* und mit $p = m \cdot v$ die maximale Geschwindigkeit v eines Neutrons der Masse m :

$$v = \frac{p}{m} = \frac{h}{\lambda \cdot m} \approx 400 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

In der *Praxis* werden Neutronen mit etwa 200 m/s erzeugt.

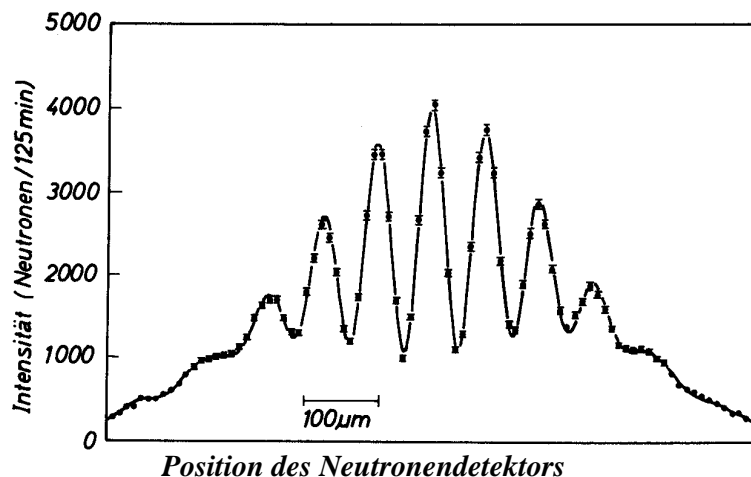
Falls Sie das obige Ergebnis nicht bekommen, blättern Sie zurück zur *Beziehung von de Broglie* (dort steht die nötige Information).

Lösung 1.4: Interferenzen mit Neutronen

Das Doppelspaltexperiment mit den Neutronen ergibt die *Intensitätsverteilung* der Figur 1.4. Wir betrachten die Stellen mit *Auslöschung* (*Minima*).

Verschliesst man einen der beiden Spalte, so treffen an solchen Stellen *mehr Neutronen* ein. Dann *verschwindet* auch das *feine Interferenzmuster*. Auf diese Weise lässt sich die *Welleneigenschaft* der Neutronen experimentell bestätigen.

Auch wenn man zuerst nur Spalt Nr. 1 und danach nur Spalt Nr. 2 offen lässt, bekommt man das *feine Interferenzmuster nicht mehr*. Jedes Neutron "*weiss*" also, welche Spalte offen sind. Es fliegt nicht etwa durch *einen einzigen Spalt*.



Figur 1.4: *Intensitätsverteilung* der Neutronen nach der Beugung am *Doppelspalt*. Die *Punkte* stellen die *gemessenen Intensitäten* dar. Die *durchgezogene Kurve* wurde mit Hilfe der *Theorie* berechnet. (Audretsch 90, 75)

Lösung 1.5: Interferenzen mit Atomen

In der Abbildung 11 des Buchs von Audretsch und Mainzer erkennt man jeweils ein ausgeprägtes Interferenzbild mit *zwei Maxima* und *einem Minimum* dazwischen. Das eine Maximum entspricht einem *durchgehenden Strahl* von Atomen (diese Atome werden nicht abgelenkt). Das zweite Maximum entsteht durch die *abgebeugten Atome* (*Beugungsmaximum*).

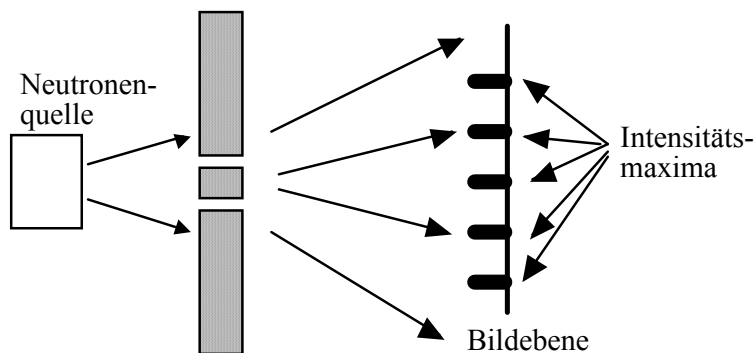
Lösung 1.6: Ein Neutron im Doppelspalt

a) Als *Sender* dient eine *Neutronenquelle* (Das Neutron wird aus einem Kernreaktor gewonnen und kurz vor dem Experiment abgebremst).

Als *Empfänger* dient ein *Neutronendetektor*. Dieser kann entlang der Bildebene verschoben werden.

b) Das Neutron wird bei den *Intensitätsmaxima* mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit empfangen. Das ist aus der *Figur 1.5* ersichtlich.

c) Bei der *Messung* wird das Neutron im Detektor empfangen. Dadurch tritt es in Form eines *Teilchens* in Erscheinung. *Vor der Messung* verhält sich das Neutron wie eine *Welle*.



Figur 1.5: In den markierten Gebieten der Bildebene (Intensitätsmaxima) wird das Neutron mit *besonders hoher Wahrscheinlichkeit* empfangen.

Wenn Sie sich nicht mehr an die Einzelheiten des Neutronenexperiments erinnern, sollten Sie den Anfang des Abschnitts 1.1.1 nochmals anschauen.

Wenn Sie sich bei dieser Aufgabe aus anderen Gründen unsicher fühlen, sollten Sie den Abschnitt 1.2 nochmals von Anfang an durchlesen.

Lösung 1.7: Experiment mit Natrium-Atomen

Die Atome werden an einem *Lichtgitter* mit sehr kurzen *Gitterabständen* gebeugt. Dazu wird mit Laserlicht im UV-Bereich eine *stehende Lichtwelle* zwischen zwei Spiegeln erzeugt. Nach erfolgter Beugung bilden die Atome ein *Interferenzbild* mit zwei Maxima und einem ausgeprägten Minimum dazwischen.

Lösung 1.8: Zaubermünzen

a) Jede Münze hat den Impuls $p = 0.1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$. Aus der *Beziehung von de Broglie* bekommt man für die Wellenlänge λ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = 6.6 \cdot 10^{-33} \text{ m.}$$

Der Abstand d zwischen den Spalten darf höchstens etwa 10^5 mal grösser sein als die Wellenlänge λ , also: $d \leq 6.6 \cdot 10^{-28} \text{ m}$.

b) Dieser Wert ist rund $2 \cdot 10^{12}$ mal kleiner als der Radius eines *Protons*. Auch mit einem "*Lichtgitter*" schafft man das nicht. So kurze Gitterabstände sind in *keinem irdischen Laboratorium* realisierbar.

c) Eine der wichtigsten Eigenschaften ist die *Temperatur* der Münze. Bei Zimmertemperatur haben die Atome eine völlig *unkontrollierbare innere Bewegungsenergie*. In diesem Fall wäre auch bei noch so kleiner Geschwindigkeit der Münzen *kein Interferenzbild* beobachtbar.

Lösung 1.9: Tennisbälle

Alle Objekte werden durch die Quantenphysik beschrieben, auch Tennisbälle. Tennisbälle können im Prinzip *Interferenzeffekte* zeigen (obwohl man sie nicht messen kann). Deshalb kann man Tennisbälle auch als "*grosse Quantenobjekte*" auffassen. Solche Objekte haben *extrem kleine Wellenlängen*. Deshalb unterscheidet sich ein solches "Quantenobjekt" kaum vom gewohnten alltäglichen Objekt.

Wieso verhalten sich Tennisbälle wie Teilchen? Wir beobachten ständig die Lage des Balls - und dadurch sehen wir die Teilcheneigenschaft.

2 Spukhafte Fernwirkungen

Übersicht und Lernziele von Kapitel 2	19
2.1 Ein Gedankenexperiment	20
2.1.1 Einstein gegen die Quantentheorie	21
2.1.2 Die Quantentheorie verteidigt sich	22
2.2 Und was meint die Natur?	23
Lernkontrolle	29
Lösungen zu den Aufgaben	30

Übersicht

Quanten sind ganz merkwürdige Dinge.

Wir wollen den Ort eines Elektrons finden. Und schon wird es *unkontrollierbar* und springt davon. Ausserdem kann ein Elektron in New York *unverzüglich* ein Elektron in Tokio beeinflussen. Können sich diese Elektronen mit Überlichtgeschwindigkeit miteinander verständigen? So sieht es nach der Quantentheorie zunächst aus.

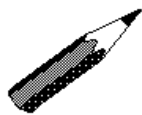
Sogar grosse Physiker wie Einstein *sträubten sich* gegen eine solche Naturbeschreibung. Nach Einstein *fehlte* irgendetwas an der Theorie. Er glaubte, man müsse sie *vervollständigen*. Jedes Messresultat wollte er voraussagen können. Zusammen mit anderen Physikern konstruierte er in Gedanken ein Experiment, das seine Argumente untermauern sollte. Trotzdem hat die Quantentheorie diesem Gedankenexperiment *standgehalten*. Bald erfahren Sie *wie*.

Lernziele von Kapitel 2

- Sie können ein *Gedankenexperiment* zur folgenden Frage beschreiben:
Können Quanten in *unerreichbarer* Ferne "spuken"?
- Dazu können Sie ein *Realexperiment* Ihrer Nachbarin oder Ihrem Nachbarn erläutern.
- Sie können das Realexperiment *interpretieren*.

2.1 Ein Gedankenexperiment

Der *Zufall* spielt in der Quantenphysik eine wichtige Rolle. Das kommt bei einer Messung durch die *Unbestimmtheitsbeziehung* zum Ausdruck. Wegen dieses Prinzips kann man grundsätzlich den Ausgang einer Messung nicht voraussagen. Mit der folgenden Aufgabe können Sie Ihre Kenntnisse zu diesem Thema auffrischen.



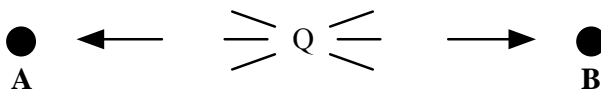
Aufgabe 2.1: Experiment mit einem Elektron

Sie möchten *gleichzeitig* den Ort und den Impuls eines Elektrons messen. Wie wirkt sich die *Unbestimmtheitsbeziehung* auf die Messung aus?

Albert Einstein wollte von dieser Unbestimmtheit nichts wissen. Er sagte einmal: "*Gott würfelt nicht.*"

Für Einstein musste man alle messbaren Grössen (wie Ort und Impuls) *genau* voraussagen können. Nach ihm mussten die Quantenobjekte *zusätzliche, verborgene Eigenschaften* besitzen, von denen die Physiker bloss (noch) nichts wussten. Diese Eigenschaften mussten für die Messresultate verantwortlich sein. Zusammen mit *Boris Podolsky* und *Nathan Rosen* konstruierte er 1935 ein *Gedankenexperiment*, mit dem er seine Vermutung prüfen wollte. Die drei Physiker stellten rein theoretische Überlegungen an.

Die *Anordnung* des Gedankenexperiments ist in der Figur 2.1 skizziert. Im Zentrum befindet sich zuerst ein Objekt *Q* in *Ruhe*. Dieses "explodiert" in zwei Teilchen **A** und **B** *gleicher* Masse. Das sind zum Beispiel zwei *Elektronen* oder zwei *Photonen* (Lichtteilchen mit der Masse 0).



Figur 2.1: Anordnung des *Gedankenexperiments* nach Einstein, Podolsky und Rosen. Ein *ruhendes* Objekt *Q* im Zentrum "*explodiert*" in zwei Teilchen **A** und **B** mit gleicher Masse.

Wie in der klassischen Physik gilt auch in der Quantenphysik die **Erhaltung des Gesamtimpulses** in einem abgeschlossenen System. Ein solches System bilden hier die Teilchen **A** und **B**. Die Impulserhaltung ist dann ersichtlich, wenn man die genauen Impulswerte beider Teilchen misst. Beide zusammen haben *denselben Impuls* wie das vor der Explosion *ruhende Objekt* *Q*. Der *Gesamtimpuls* ist gleich null. Beide Teilchen fliegen somit in entgegengesetzter Richtung und mit dem *gleichen* Geschwindigkeitsbetrag davon.

Weil **A** und **B** die gleiche Masse haben, ist das Experiment um *Q* genau **spiegelsymmetrisch**. Es ändert sich nichts, wenn man links und rechts vertauscht. Wenn man also den genauen *Ort* bei beiden Teilchen misst, findet man sie *gleich weit* vom Zentrum entfernt.

Infolge der *Unbestimmtheitsbeziehung* kann man allerdings den Ort und den Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig genau kennen.

Wenn man den genauen Impuls der Teilchen **A** und **B** misst, kommt *nur* die *Impulserhaltung* zum Ausdruck. Misst man den genauen Ort, so stellt man *nur* die *Spiegelsymmetrie* fest.

Beides sind aber *grundlegende Erhaltungssätze* der Physik. Man kann stets entweder aus *einem Impuls* auf den *anderen Impuls* oder aus *einem Ort* auf den *anderen Ort* schliessen.

Man sagt: **A** und **B** sind *miteinander verschränkt*.

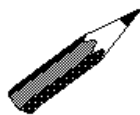
Definition:

Zwei Teilchen heissen **miteinander verschränkt**, wenn sie durch *grundlegende Erhaltungssätze* miteinander verknüpft sind.

2.1.1 Einstein gegen die Quantentheorie

Mit seinem Gedankenexperiment wollte Einstein *zwei innere Widersprüche* aufdecken.

1

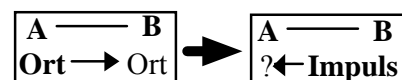


Aufgabe 2.2: Der erste Widerspruch

Diesen sollen *Sie* herausfinden. In Gedanken messen Sie den genauen *Ort* des Teilchens **A**. Da das Teilchen **B** gleich weit vom Zentrum (Q) entfernt ist wie **A**, kennen Sie auch den genauen Ort von **B**.

Danach messen Sie den *Impuls* von **B**. Dadurch verlieren Sie sogleich die Ortsinformation von **B**. Doch haben Sie an **A** *keinen Eingriff* vollzogen. Beide Teilchen liegen so weit auseinander, dass **B** auf **A** *keinen Einfluss* hat.

Wir fassen die Vorgänge in Bildern zusammen:



- Welche Grössen kennen Sie am Schluss für die Teilchen **A** und **B**?
- Was ist an diesem Resultat *sinnlos*?

Die *Unbestimmtheitsbeziehung* scheint auf wackeligen Füßen zu stehen.

2

Und nun zum *zweiten Widerspruch*.

Die Erfahrung lehrt, dass man ein Signal *höchstens* mit *Lichtgeschwindigkeit* übertragen kann. Nun warten wir, bis sich **A** und **B** auf astronomische Distanzen entfernt haben. Das Licht braucht womöglich Millionen Jahre, um von **B** nach **A** zu gelangen.

Misst man den Impuls von **B**, so steht *gleichzeitig* der Impuls von **A** fest: Diesen kann man *unverzüglich* bei **A** nachweisen. Die Messung von **B** wirkt sich also *unverzüglich* auf die Messung von **A** aus. Wird etwa ein Signal mit *unendlich grosser Geschwindigkeit* übermittelt?

Für Einstein war eine solche *spukhafte Fernwirkung* nicht möglich.

Einstein schloss daraus, dass die Quantenphysik *unvollständig* ist. Wer konnte etwas gegen seine Argumente einwenden?

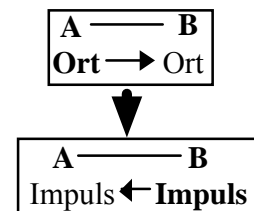
2.1.2 Die Quantentheorie verteidigt sich

Niels Bohr (dänischer Physiker, 1885 - 1962) war einer der grössten *Verfechter* der Quantentheorie. Natürlich liess er sich Einsteins Attacke nicht gefallen.

Nach Bohr sind verschränkte Teilchen **A** und **B** *nicht voneinander unabhängig*. Beide Teilchen zusammen verhalten sich so, als wären sie *ein einziges Quantenobjekt*.

Eine Messung bei **A** oder **B** bedeutet dasselbe wie eine Messung bei **A** und **B**. Wird der *Impuls* von **B** gemessen, so verliert man die *Ortsinformation* von **B**. Gleichzeitig bekommt man dann den *Impuls* von **A** und verliert die *Ortsinformation* von **A**. Damit ist die Unbestimmtheitsbeziehung *gerettet*.

Die Unbestimmtheitsbeziehung gilt für das Teilchenpaar als *Ganzes*.



Zudem tauschen **A** und **B** *nicht wirklich Signale* aus. Beide Teilchen verhalten sich ja wie ein einziges Quantenobjekt. Und die "Signale" enthalten auch nur Resultate von *Zufallseignissen*.



Aufgabe 2.3: Ein Radiogeschäft in den 40er Jahren

Ein Verkäufer möchte einen *neuen Radiosender* verkaufen: "Dieses Gerät funktioniert dank *verschränkter Teilchen*. Das eine Teilchen befindet sich in der Sendestation, das andere im Empfangsgerät. Ist das nicht genial?"

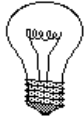
Was würde sein Kunde erwidern, und wie würde er argumentieren, wenn er

a) *Einstein*

b) *Bohr* hiesse?

Nach unserer alltäglichen Erfahrung sind die Eigenschaften eines Gegenstands direkt mit dem *Ort* des Gegenstands verbunden (*lokales Verhalten*). Wenn ein Auto in Zürich nach links abbiegt, merkt man in New York nichts davon. Für **Einstein** galt dieses lokale Verhalten auch für die Quanten.

Bohr sah die Quanten anders. Nach ihm sind die Eigenschaften eines Quantenobjekts *nicht bloss an einem Ort* gebunden (*nicht-lokales Verhalten*). Für unser Gedankenexperiment heisst das: Die Eigenschaften eines Objekts **A** sind auch bei einem anderen, *weit entfernten* Objekt **B** vorhanden. Nach Bohr können die Eigenschaften eines Quantenobjekts an *verschiedenen Orten im Raum* vorhanden sein.



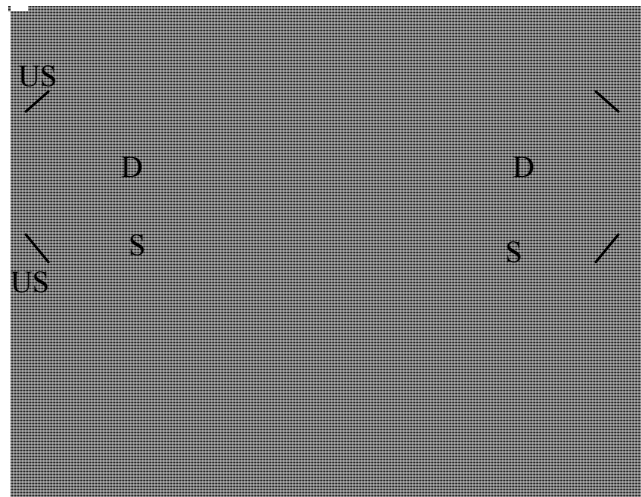
Wir fassen zusammen:

Nach der *Unbestimmtheitsbeziehung* kann man nicht gleichzeitig den Ort und den Impuls eines Teilchens genau messen. Das gilt auch, wenn zwei Teilchen gleichzeitig aus einem ruhenden Teilchen hervorgehen (*verschränkte Teilchen*). Für Einstein führte das zu *inneren Widersprüchen* der Quantentheorie. Nach Bohr als Verfechter der Quantentheorie verhalten sich verschränkte Teilchen so, als seien sie *ein einziges Quantenobjekt*. Die Eigenschaften eines Objekts sind dann nicht mehr an einem einzigen Ort gebunden (*nicht-lokales Verhalten*).

2.2 Und was meint die Natur?

Wer hatte recht, *Einstein* oder *Bohr*? Offenbar kann nur ein *wirkliches Experiment* über diese Frage entscheiden. Ein beeindruckendes Experiment hat **J. D. Franson** im Jahre 1989 vorgeschlagen. Man hat es 1993 verwirklicht (Chiao 93).

Die Anordnung des Experiments ist aus der Figur 2.2 ersichtlich. In einem speziellen *Kristall* Q werden paarweise *verschränkte* Photonen erzeugt. Jedes der beiden Photonen wird jeweils durch eine Anordnung von Spiegeln zu einer *Messzelle* M geführt. Die beiden Lichtwege sind *spiegelsymmetrisch* aufgebaut. Das heisst, eine Vertauschung von rechts und links würde die Anordnung nicht verändern. Wie bei einer Strassenumleitung kann auf beiden Seiten ein gewisses Streckenstück entweder *direkt* (D) oder über einen *Umweg* (U) durchlaufen werden. Beides ist *gleich wahrscheinlich*. Die Wahl bleibt jedem einzelnen Photon überlassen. Als Verzweigung dient ein *halbdurchlässiger Spiegel* S.



Figur 2.2: Prinzipskizze des Experiments nach Franson. Von einem speziellen *Kristall* (Q) aus werden zwei *verschränkte Photonen* zu den *Messzellen* (M) geführt und können dank *halbdurchlässiger Spiegel* (S) entweder den *direkten* Weg (D) oder den *Umweg* (U) wählen. Die übrigen Richtungsänderungen erfolgen durch *Umlenkspiegel* (US). Die Messzellen sind mit einem *Koinzidenzzähler* (K) verbunden.

Nun haben beide Photonen dieselbe *Lichtgeschwindigkeit*. Wenn sich *beide* gleich entscheiden, legen sie *dieselbe Wegstrecke* zurück. Dann kommen auch beide gleichzeitig bei den Messzellen an (man sagt, es tritt eine **Koinzidenz** ein). *Andernfalls* sind die Wegstrecken verschieden: Eines der Photonen kommt vor dem anderen an (**keine Koinzidenz**).

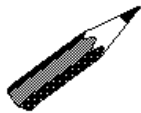
Beide Messzellen sind mit einem Gerät verbunden, das die *Ankunftszeiten* vergleicht. Dort wird jede Koinzidenz durch eine Zählvorrichtung registriert (*Koinzidenzzähler* K). Die Anzahl *registrierter Koinzidenzen* ist also gleich der Anzahl *gleichzeitig angekommener Paare*.



Aufgabe 2.4: Zur Messanordnung nach Franson

Vergleichen Sie die Messanordnung nach Franson (Figur 2.2) mit der Anordnung im Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen. Halten Sie Ihren Vergleich in Stichworten fest. Welche *Gemeinsamkeiten* gibt es? Worin *unterscheiden* sich die beiden Anordnungen (machen Sie dazu eine *Tabelle*)?

Schauen Sie unseren Vorschlag am Ende des Kapitels *erst* nach, wenn Sie Ihren Vergleich abgeschlossen haben.



Aufgabe 2.5: Koinzidenz oder nicht?

Sowohl das linke als auch das rechte Photon eines Paares kann jeweils den *Umweg* (U) oder den *direkten Weg* (D) durchlaufen. In welchen Fällen tritt eine *Koinzidenz* ein? Füllen Sie die folgende Tabelle mit *ja* und *nein* aus:

Koinzidenz?	rechts (U):	rechts (D):
links (U):		
links (D):		



Aufgabe 2.6: Was wäre, wenn ...

Wir betrachten *zwei einfache Situationen* mit der Messanordnung nach Franson. Wir nehmen an, dass 100 Photonenpaare von den Messzellen erfasst werden.

a) Nach *Bohr* verhält sich jedes Photonenpaar wie *ein einziges Quantenobjekt*. Geben Sie die erwartete *Anzahl Koinzidenzen* für diesen Fall an. *Begründen* Sie Ihre Antwort.

b) Wir ersetzen den Kristall durch zwei voneinander *unabhängige Lichtquellen*, welche *gleichzeitig* je ein Photon aussenden. Sonst besteht jetzt zwischen den beiden Photonen *kein* Zusammenhang. Wie gross ist nun die *Anzahl Koinzidenzen* für 100 eintreffende Photonenpaare?

In der Aufgabe 2.6 a) haben Sie sich bereits Gedanken über einen möglichen *Ausgang* des *Experiments* nach Franson gemacht.

Aber Vorsicht! Einsteins Idee soll *nicht zu demselben Ergebnis* führen wie Bohrs Idee! Nach **Einstein** könnten nämlich die Photonen *vor dem Start* insgeheim untereinander "*abmachen*", ob sie den Umweg einschlagen sollen oder nicht. Das wäre ein **lokales Verhalten**.

Eine derartige Abmachung *schliesst* man folgendermassen *aus*.

Man verändert im Experiment die *Weglänge* des *linken* Umwegs: Die Umlenkspiegel auf der Umwegstrecke werden verschoben (*siehe Figur 2.2*).

Jedes Photon steht vor der Wahl zwischen zwei Wegen. Das ist genau wie beim *Doppelspaltexperiment*. Ein Quantenobjekt benutzt *beide Spalte* zugleich, was zu *Interferenzen* führt. Genauso ist es beim Experiment nach Franson. Ein Photon benutzt den *Umweg* und den *direkten Weg* zugleich. Diese Art von Interferenz erzeugt in diesem Fall nicht ein Interferenzbild auf einem Schirm, sondern beeinflusst die *Ankunftszeit* in der Messzelle.

Somit beeinflusst eine *Verlängerung* des linken Umwegs die *Ankunftszeit* des linken Photons.

Beim Start darf das *rechte* Photon jedoch nichts von der Umwegveränderung wissen. Man nimmt sie also erst kurz vor der Ankunft beider Photonen bei den *Verzweigungen* vor (S auf der Figur 2.2).

Nach **Bohr** weiss das *rechte* Photon *jederzeit*, was das *linke* macht (**nicht-lokales Verhalten**). Falls das linke Photon auf die veränderte Umweglänge *reagiert*, merkt es das rechte Photon. *Beide* Photonen können also rechtzeitig *reagieren*.

Das Resultat: Bei *nicht-lokalem* Verhalten schlagen die Photonen ihre Wege "*anders*" ein als bei *lokalem* Verhalten.



Aufgabe 2.7: Änderung der Umweglänge

Die Umweglänge wird links nur *ganz wenig* verändert.
Überlegen Sie sich die folgenden Fragen rein *qualitativ*.

- a) Wie *reagieren* die Photonen rechts auf die Umwegverlängerung links, wenn sie sich (1) *lokal* bzw. (2) *nicht-lokal* verhalten? *Weshalb?*
Ihre Antwort sieht zum Beispiel so aus: Wird die Weglänge des linken Photons verändert, dann kann das rechte Photon ..., weil ...
- b) Wenn ein einzelnes Photon zwischen dem Umweg und dem direkten Weg wählen kann, benutzt es *beide Wege zugleich*. Trotzdem misst man dann nur *eine Ankunftszeit*. Haben Sie dafür eine *Erklärung*?
- c) Rechts *merken* Photonen mit *nicht-lokalem* Verhalten die Änderung der linken Umweglänge. Darauf kann jedes Photon *rechtzeitig* reagieren, wenn es seine *beiden Wege* einschlägt. Lässt sich auf diese Weise wieder eine *Koinzidenz* erreichen? Geben Sie eine *Begründung*.
- d) Wovon hängt die Anzahl Koinzidenzen ab, wenn sich die Photonen (1) *lokal* bzw. (2) *nicht-lokal* verhalten?

Sie können sich jetzt denken, worauf es beim Experiment nach Franson ankommt:

Verschränkte Photonen mit *nicht-lokalem* Verhalten können eine *höhere Anzahl Koinzidenzen* erreichen als solche mit *lokalem* Verhalten.

Diese Aussage lässt sich mit allgemeinen theoretischen Überlegungen beweisen. Auf den umständlichen Beweis verzichten wir.

Das Experiment nach Franson ist zu aufwendig, um an der Schule durchgeführt zu werden. Dafür können Sie es mit dem folgenden einfachen *Modell* nachahmen. Dadurch vertiefen Sie Ihr Verständnis für dieses Experiment.



Modellexperiment 2.1

Die Forschergruppe um R. Y. Chiao hat 1993 in Berkeley das Experiment nach Franson durchgeführt (Chiao 93). Die *originalen Messdaten* dieses Experiments wurden für die vorliegende Nachahmung in passender Form übernommen¹.

a) Fertigen Sie das *Modellexperiment* mit Hilfe der beiden vorgedruckten Kartonbögen an. Dazu befolgen Sie die Anweisungen auf dem Bogen 2.

b) Verschieben Sie den beweglichen Streifen so, dass links und rechts der Umweg U gleich lang ist (Umwegverlängerung l in der Position 0 nm). In den Messzellen M treffen *100 Photonenpaare* ein. Am Koinzidenzzähler K können Sie nun die Anzahl Koinzidenzen N ablesen. Tragen Sie diese Zahl in der vorbereiteten *Graphik* ein (Anzahl Koinzidenzen als Funktion der links eingestellten Umwegverlängerung l). Lassen Sie sich im Moment von der vorgedruckten Kurve nicht stören.

c) Vergleichen Sie diesen Wert N mit den 100 in M eingetroffenen Photonenpaaren. Können Sie daraus erahnen, dass gewisse Photonen den einen oder den anderen *Weg bevorzugen*? Aus welchem Grund?

d) Verändern Sie die *Umwegverlängerung* l . Tragen Sie jedesmal den beobachteten Wert N in die Graphik ein. Nun erkennen Sie für jede Umweglänge, wie oft beide Photonen gleichzeitig zum Ziel kommen. Zeichnen Sie eine möglichst *einfache Kurve* in groben Zügen entlang der Messpunkte. Die Kurve soll die mittleren Werte von N sichtbar machen. Können Sie sich den *Verlauf* der Messkurve erklären?

Wie bei den gewöhnlichen Aufgaben finden Sie die Lösung am Schluss des Kapitels.

Die Graphik vom Teil d) des Experiments 2.1 enthält genügend Information, um *Einsteins* Hypothese (*lokales Verhalten*) zu widerlegen.

Achten Sie insbesondere auf die *gestrichelte Kurve*. Sie gibt die *maximalen* Anzahlen von Koinzidenzen an, die man von Photonen mit *lokalem* Verhalten erwarten kann. Diese Kurve wurde aus theoretischen Überlegungen ermittelt (auf die wir hier nicht näher eingehen). Der mittlere Bereich dieser Kurve liegt deutlich *unterhalb der Messdaten*. Also verhalten sich Photonen *nicht-lokal*. Wir müssen demnach *alle lokalen Theorien verwerfen*.

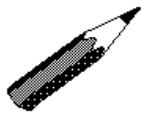
Hier ist folgendes zu bemerken. Das Experiment nach Franson zeigt zwar, dass sich Quantenobjekte *nicht-lokal* verhalten müssen. Das *schliesst* jedoch nicht-lokale Theorien mit

¹ Einzig die Gesamtzahl eingetroffener Photonenpaare und die Wellenlänge des Lichts wurden nachträglich von den Autoren dieses Leitprogramms geschätzt.

verborgenen Eigenschaften nicht aus. Im obigen Experiment wären das zum Beispiel Abmachungen zwischen verschränkten Photonen lange *nach ihrem Start*.

Bereits heute macht man sich das nicht-lokale Verhalten von Quantenobjekten zunutze. So haben Forscher ein völlig sicheres Verfahren für die Übertragung geheimer Information gefunden. Die Information wird dank verschränkter Quantenobjekte verschlüsselt (Quantenkryptographie). Interessierte Leser finden mehr dazu auf der folgenden Internetseite: www.nzz.ch/2002/06/26/ft/page-article88JHX.html.

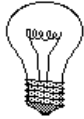
Verschränkte Teilchen sind in der Natur *alles andere als selten*. Alle *Bausteine* der Materie, seien es Photonen, Elektronen, oder gar Protonen, wurden in solchen Teilchenpaaren erzeugt. Stellen Sie sich vor, dass die *ganze* Materie mit solchen Verschränkungen ihren "Spuk" treibt. Sogar der Stuhl, auf dem Sie sitzen!



Aufgabe 2.8: Nicht-lokales Verhalten

Diese Aufgabe können Sie auf *zwei Arten* bewältigen. Entweder *diskutieren* Sie mit einer Klassenkameradin oder einem Klassenkameraden, der etwa so weit gekommen ist wie Sie, oder Sie arbeiten *individuell* und legen Ihre Gedanken schriftlich nieder. Diese Aufgabe sollte in beiden Fällen nicht mehr als *etwa 5 Minuten* beanspruchen.

- a) Uns wohlvertraute Objekte wie Ping-Pong-Bälle, Autos oder Planeten zeigen offenbar ein *lokales* Verhalten. Was könnten Sie möglicherweise beobachten, wenn sich diese Objekte *nicht-lokal* verhielten?
- b) Oft verhalten sich *eineiige Zwillingbabys* so, dass sogar ihre eigenen Eltern sie nur mit Mühe unterscheiden können. Halten Sie diese Erscheinung eher für "*lokal*" oder "*nicht-lokal*"? *Begründen* Sie Ihre Meinung.
- c) Der letzte Abschnitt hat gezeigt, dass Fernwirkungen zwischen Quanten durchaus nicht auf unserem Experiment beschränkt sind. Sie sind in der *ganzen Materie* verbreitet. Welche *philosophischen Konsequenzen* ziehen Sie daraus?

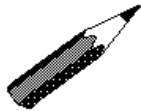
**Wir fassen zusammen:**

Verschränkte Teilchen sind so miteinander verbunden, als seien sie *ein einziges Quantenobjekt*. Diese Interpretation wurde mit dem *Experiment* nach Franson bestätigt. Darin kamen zuweilen zwei Photonen *öfter gleichzeitig* an, als nach lokalen Theorien zu erwarten war. Damit wurden sämtliche *lokalen Theorien* verworfen. Quantenobjekte haben ein *nicht-lokales* Verhalten: Ihre Eigenschaften lassen sich aus grossen Distanzen unverzüglich erkennen und sogar verändern. Allerdings werden auf diese Weise *keine wirklichen Signale* übertragen. Verschränkte Teilchen sind in der Welt des Kleinen weit verbreitet.

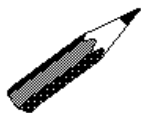
Lernkontrolle

**Aufgabe 2.9: Einstein und Bohr**

Worin unterschieden sich die Auffassungen von *Einstein* und *Bohr* in Bezug auf die Quantenphysik? Geben Sie zwei wesentliche Punkte. Drücken Sie sich so aus, dass es Ihre Freunde verstehen.

**Aufgabe 2.10: Das Experiment nach Franson**

Beschreiben Sie dieses Experiment in etwa drei Sätzen und mit einer Skizze.

**Aufgabe 2.11: Fernwirkungen**

Geben Sie *zwei wichtige Unterschiede* zwischen der Fernwirkung zweier verschränkter Teilchen und der Satellitenübertragung einer Fernsehsendung an.

Wenn Sie sich sicher fühlen, können Sie sich zum Kapiteltest melden.

Lösungen zu den Aufgaben

Lösung 2.1: Experiment mit einem Elektron

Nach der *Unbestimmtheitsbeziehung* kann ich in meinem Experiment *nicht gleichzeitig* den Ort und den Impuls des Elektrons *genau* bestimmen. Falls ich beide Grössen gleichzeitig messe, erreichen beide Messwerte nur eine begrenzte Genauigkeit. Das liegt nicht an meiner Gewissenhaftigkeit. Die bestmögliche Genauigkeit wird durch die *Unbestimmtheitsbeziehung* festgelegt.

Ich kann den *Ort* beliebig genau messen. Dann kann ich über den *Impuls* nichts erfahren. Messe ich den Impuls *nachträglich*, so *verliere* ich die genaue Kenntnis des Ortes.

Umgekehrt kann ich den *Impuls* genau messen. Diesmal bleibt der *Ort* völlig unbestimmt.

Wenn Sie mit der Unbestimmtheitsbeziehung jetzt noch Mühe haben, sollten Sie Ihre Unterlagen zu diesem Thema nochmals aufschlagen.

Lösung 2.2: Der erste Widerspruch

Am Anfang kenne ich den genauen *Ort* von **A** und **B**. Sobald ich den genauen *Impuls* von **B** messe, *verliere* ich den *Ort* von **B**. Doch kenne ich weiterhin den *Ort* von **A**. Jetzt wende ich den *Impulssatz* an. Aus der Impulsmessung von **B** kann ich auf den *Impuls* von **A** schliessen. Für **A** habe ich neben dem Ort noch den Impuls hinzugewonnen.

Bilanz:

- 1) Von **B** kenne ich nur den *Impuls*.
- 2) Von **A** kenne ich zugleich den *Ort und den Impuls*. Das ist aber im *Widerspruch* zur Unbestimmtheitsbeziehung.

Wenn Sie ein anderes Resultat erhalten haben, sollten Sie die Aufgabe 2.1 nochmals bearbeiten und anschliessend den Abschnitt über die Impulserhaltung nochmals durchlesen. Dann versuchen Sie wieder die Aufgabe 2.2.

Lösung 2.3: Ein Radiogeschäft in den 40er Jahren

- a) *Einstein*: Ein solcher Radiosender wäre höchstens dann möglich, wenn irgendwelche Signale mit *Lichtgeschwindigkeit* zwischen den verschränkten Teilchen ausgetauscht würden. Ich denke aber nicht, dass eine einfache Messung eine solche Fernwirkung auslösen würde. Ausserdem sehe ich den Vorteil eines solchen Gerätes gegenüber den gewöhnlichen Radiosendern nicht.
- b) *Bohr*: Es klingt zwar verlockend, "Signale" mit *Überlichtgeschwindigkeit* zu senden. Doch fände ich es nicht gerade interessant, wenn mein Radiosender nur *Zufallszahlen*

senden könnte. Man kann gewiss nicht *wirkliche Radiosendungen* schneller als Licht transportieren.

Für die Beantwortung dieser Frage gibt es mehrere mögliche Varianten. Die obige Lösung ist nur ein Vorschlag. Allerdings sollte Ihre Antwort die wesentlichen Punkte enthalten. Andernfalls schauen Sie die betreffenden Abschnitte besser nochmals an.

Lösung 2.4: Zur Messanordnung nach Franson

Das Gedankenexperiment und das Experiment nach Franson haben folgendes **gemeinsam**:

- Zwei *verschränkte* Teilchen gleicher Masse werden erzeugt. Eine Impulsmessung würde wegen der Impulserhaltung für beide Teilchen stets den gleichen Wert ergeben.
- Die beiden Teilchen *entfernen sich* weit voneinander. Sie werden voneinander "*isoliert*".
- Die Anordnung des Versuchs ist *spiegelsymmetrisch* aufgebaut. Eine Vertauschung von rechts und links würde nichts ändern.

Folgende **Unterschiede** haben die beiden Anordnungen:

<i>Gedankenexperiment</i>	<i>Experiment nach Franson:</i>
<ul style="list-style-type: none"> - <i>Ort</i> und <i>Impuls</i> werden direkt gemessen. - Messungen können an <i>beliebigen Orten</i> stattfinden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die <i>Ankunftszeit</i> wird gemessen. - Die Photonen können zwischen dem <i>Umweg</i> und dem <i>direkten Weg</i> wählen.

*Die obigen Angaben sind **eine** von mehreren möglichen Lösungen. Wenn nötig, lesen Sie die Beschreibung des Gedankenexperiments und des Experiments nach Franson nochmals durch.*

Lösung 2.5: Koinzidenz oder nicht?

Koinzidenz?	rechts (U):	rechts (D):
links (U):	<i>ja</i>	<i>nein</i>
links (D):	<i>nein</i>	<i>ja</i>

Wenn Sie nicht das gleiche Resultat bekommen haben, lesen Sie den Abschnitt zu den Koinzidenzen nochmals durch. Danach schauen Sie wieder die obige Tabelle an.

Lösung 2.6: Was wäre, wenn ...

- a) Bei *allen Photonenpaaren* verhalten sich beide Photonen gleich: *Beide* durchlaufen entweder den Umweg oder den direkten Weg. Deshalb kommen sie *stets gleichzeitig* an. Es werden *100 Koinzidenzen* erwartet.

- b) Die Photonen sind bei jedem Paar *nicht verschränkt* und verhalten sich unabhängig voneinander. Sie schlagen nur mit *50% Wahrscheinlichkeit* beide denselben Weg ein. Deshalb werden nur *50 Koinzidenzen* erwartet.

Falls Sie andere Zahlen erhalten haben, sollten Sie den Abschnitt 2.2 nochmals von vorne durchlesen.

Lösung 2.7: Änderung der Umweglänge

- a) Wegen der unterschiedlichen Umweglängen kommen die Photonen gewisser Paare *nicht gleichzeitig* an. Dadurch *nimmt* die Anzahl Koinzidenzen grundsätzlich *ab*. Diese Abnahme hängt allerdings davon ab, wie sich beide Photonen *zueinander* verhalten.

- (1) **Lokales Verhalten:** Die Photonen schlagen ihre Wege so ein, wie sie es am *Anfang* abgemacht haben. Sie können auf eine *spätere Veränderung* der Umweglänge *nicht mehr reagieren*.
- (2) **Nicht-lokales Verhalten:** Die Photonen *merken* den plötzlichen Wegunterschied und können darauf *reagieren*. Sie können zum Beispiel einen Weg einschlagen, den sie *vorher vermeiden* wollten.

Wenn Sie die Teilaufgabe a) nicht lösen konnten, sollten Sie den Text zwischen den Aufgaben 2.6 und 2.7 nochmals langsam durchlesen.

- b) Trotz der unterschiedlichen Weglängen misst man nur *eine* Ankunftszeit. Also muss die Startzeit *zwei verschiedene Werte* haben: Sie ist *unbestimmt*.

*Vielleicht erscheint Ihnen diese Situation seltsam. Das ist ganz natürlich. Vermutlich neigen Sie dazu, sich **ein** Teilchen auf **zwei** Wegstrecken zugleich vorzustellen. Das ist leider eine Fehlvorstellung. Die beiden Wegstrecken entsprechen nämlich den beiden Spalten beim Doppelspaltexperiment (siehe Kapitel 1).*

- c) Dadurch lässt sich in der Tat eine *Koinzidenz* erreichen.

Jedes Photon schlägt *den Umweg und den direkten Weg zugleich* ein. Also ist die *Startzeit* bei beiden Photonen *unbestimmt*. Auch die Ankunftszeiten sind unvorhersagbar. Die Photonen *können aber gleichzeitig* in den Messzellen ankommen. Das werden auch einige Photonenpaare tun. Weil die Photonen *verschränkt* sind. *Solche Koinzidenzen* spielen in unserem Experiment eine entscheidende Rolle.

Wenn Sie hier stecken geblieben sind, beachten Sie die vorangehenden Lösungen. Danach kommen Sie auf die Teilaufgabe c) zurück.

- d) (1) **Lokales Verhalten:** Die Anzahl Koinzidenzen hängt *nur* von der veränderten Weglänge des linken Umwegs ab.
- (2) **Nicht-lokales Verhalten:** Die Photonen *merken* den plötzlichen Wegunterschied und können darauf *reagieren*. Sie tun das gemäss Aufgabe c). Diesen Effekt muss man für die Anzahl Koinzidenzen *zusätzlich* berücksichtigen.

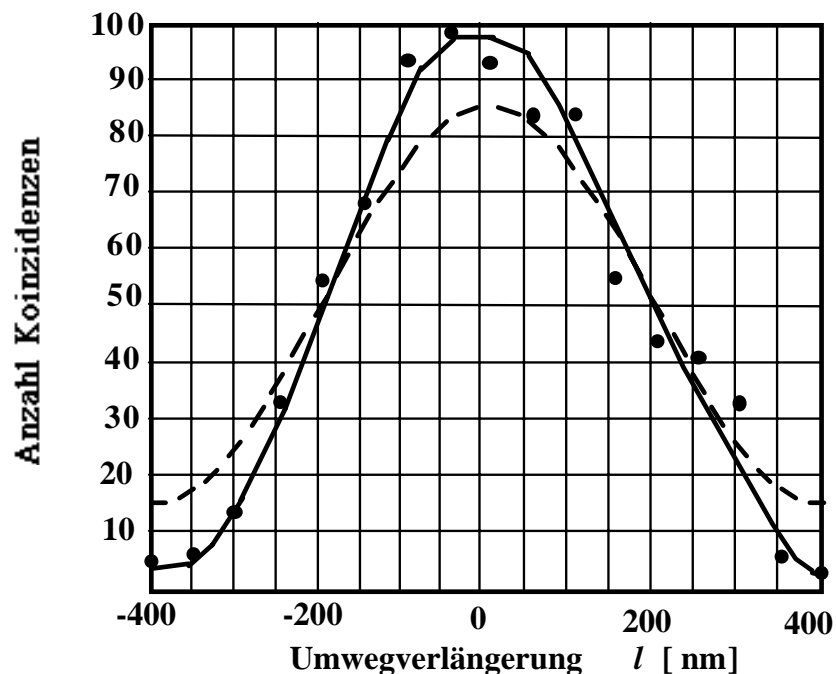
Lösung zum Modellexperiment 2.1

b) Am Koinzidenzzähler können Sie nun 93 Koinzidenzen ablesen.

Falls Sie eine andere Zahl bekommen haben, überprüfen Sie, ob die Umwegverlängerung links 0 nm beträgt.

c) Bei 100 angekommenen Paaren sind 93 Koinzidenzen beobachtet worden. Das sind *nahezu 100 %*. Wahrscheinlich ist die Anordnung *nicht ganz symmetrisch*. Eine exakt symmetrische Anordnung hätte vielleicht 100 Koinzidenzen ergeben. Vermutlich schlagen verschränkte Photonen entweder *beide den direkten Weg* oder *beide den Umweg* ein.

d) Sie sollten in etwa die *ausgezogene Kurve* der Figur 2.3 erhalten haben. Die *Messwerte von N* schwanken zwar. Das ist jedoch nicht aussergewöhnlich. Auch bei einer Volkszählung schwanken die Einwohnerzahlen pro Altersgruppe. Der *maximale Wert* von N liegt ungefähr bei 0 nm und erreicht sogar bis zu 99 Koinzidenzen. Bei zunehmender Veränderung von l nehmen die Werte von N einigermaßen stetig ab. Die Kurve nimmt einen *"vernünftigen" Verlauf*.



Figur 2.3: Anzahl Koinzidenzen N als Funktion der Umwegverlängerung l . Die Punkte stellen die Messwerte dar. Die *ausgezogene Kurve* ist eine Art *Mittelung* zu den Messpunkten und sollte in etwa mit Ihrer Kurve übereinstimmen.

Fahren Sie nun weiter. Gleich erfahren Sie, was die gestrichelte Kurve bedeutet.

Lösung 2.8: Nicht-lokales Verhalten

Diese Aufgabe sollen Sie nach eigenem Ermessen beantworten. Zu a) geben wir nur ein *kurzes Beispiel* und zu b) einen *kurzen Anhaltspunkt* an. Damit sehen Sie auch, wie wir uns Ihre Diskussion vorstellen.

- a) Ein Fussgänger möchte aus 100 m Entfernung ein fahrendes Auto anhalten und stampft mit dem Fuss auf den Boden. Die Bewegung *überträgt sich* ohne Zwischenverbindung (ohne Funk etc.) auf das Bremspedal des Autos. Das sieht schon sehr nach "Spuk" aus.
- b) Beide Babys tragen *dieselbe Erbinformation*. Prinzipiell zeigen sie ein *lokales* Verhalten. Körperliche Veränderungen (zum Beispiel kleine Verletzungen) des einen hat auf dem anderen keine Auswirkung. Dagegen ist das *"ähnliche Spielverhalten"* der beiden nicht einfach zu deuten.

Lösung 2.9: Einstein und Bohr

Für **Einstein** musste das Ergebnis jeder Messung *genau vorhersagbar* sein, so wie wir es in der klassischen Physik kennen. Allerdings ist das in der Quantentheorie nicht möglich. Deshalb hielt sie Einstein für eine *unvollständige* Theorie.

Für **Bohr** war das Ergebnis einer Messung von Natur aus mit Zufall behaftet. Man konnte höchstens *Wahrscheinlichkeitsangaben* über den Ausgang einer Messung machen.

Nach **Einstein** waren die Eigenschaften eines Elektrons am *Ort* des Elektrons gebunden. Das Elektron konnte seine Umgebung *nicht sofort* beeinflussen. Es konnte im besten Fall ein Signal mit *Lichtgeschwindigkeit* aussenden.

Nach **Bohr** waren die Eigenschaften eines Teilchens nicht an *einem Ort* gebunden. Wenn zwei Teilchen aus *demselben Mutterteilchen* hervorgingen, verhielten sie sich zusammen wie *ein einziges Objekt*. So konnten sie einander über *weite Distanzen* sofort beeinflussen. Dabei tauschten Sie *kein wirkliches Signal* aus.

Lösung 2.10: Das Experiment nach Franson

Verschränkte Photonenpaare werden durch eine *spiegelsymmetrische* Anordnung zu zwei *Messzellen* M geführt. Jedes Photon kann ein gewisses Streckenstück entweder *direkt* oder über einen *Umweg* durchlaufen. Mit einem Koinzidenzzähler wird nachgewiesen, ob die beiden Photonen jeweils *gleichzeitig* ankommen, d.h. ob sie *denselben Weg* eingeschlagen haben. (Skizze: siehe Figur 2.2!)

Lösung 2.11: Fernwirkungen

- Nur bei der Satellitenübertragung werden *wirkliche Signale* übertragen. Fernwirkungen verschränkter Teilchen enthalten *Zufallsergebnisse*.
- Die Fernwirkung verschränkter Teilchen erfolgt *unverzögerlich*; die Satellitenübertragung erfolgt mit *Lichtgeschwindigkeit*.

3 Tot oder lebendig?

Übersicht und Lernziele von Kapitel 3	35
3.1 Vom Messprozess zum Katzendrama	36
3.2 Verschiedene Interpretationen	40
Lernkontrolle	42
Lösungen zu den Aufgaben	43

Übersicht

Messen ist das tägliche Brot des Physikers. In den vorangehenden Kapiteln haben wir eine Messung als etwas *Selbstverständliches* erachtet. Eigentlich müssten wir etwas vorsichtiger sein. Die Quantenphysik hat auch hier eine *Überraschung* zu bieten.

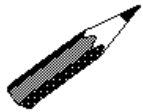
Bekanntlich ist das Resultat einer Messung prinzipiell *nicht vorhersagbar*. Vielmehr entstehen die Eigenschaften eines *Teilchens* erst bei der Messung seines Ortes, seines Impulses oder anderer beobachtbarer Grössen. Anders gesagt: Der Beobachter "*erschafft*" sein eigenes Teilchen. Für den Experimentalphysiker ist das o.k. Aber vom *philosophischen* Standpunkt her gesehen haben wir ein unerhörtes *Problem*. *Niemand* hat bisher eine brauchbare *Lösung* gefunden. Was macht denn so vielen Physikern *Sorge*? Anhand eines *Katzendramas* werden Sie es gleich erfahren.

Lernziele von Kapitel 3

- Sie können bei Ihrer nächsten Party vom *Katzendrama* erzählen.
- Die *philosophische* Bedeutung des *Messprozesses* ist Ihnen bewusst. Sie können *mögliche Interpretationen* Ihrem Philosophielehrer erklären und mit ihm diskutieren.
- Sie erkennen die *Übergänge* zwischen Quantenphysik, Philosophie und noch unerforschten physikalischen Theorien.

3.1 Vom Messprozess zum Katzendrama

Eine *Messung* kann man mit einem beliebten Gesellschaftsspiel veranschaulichen. Der Physiker *John Wheeler* hat es treffend gezeigt. Sie können seine Geschichte in einem Buch aus der *Handbibliothek* nachlesen.



Aufgabe 3.1: Das Spiel der "zwanzig Fragen"

Nehmen Sie das Buch von P.C.W. Davies und J.R. Brown, "*Der Geist im Atom*", Insel Verlag, Frankfurt a. M. und Leipzig, 1993.

Schlagen Sie die Seiten 36-37 auf und lesen Sie die *kleingedruckte Geschichte*:

"Dann war es an mir ..." *bis*

"... als es kein nachgewiesenes Phänomen ist."

Stellen Sie das Buch erst zurück, wenn Sie die Aufgabe vollständig gelöst haben.

Falls das Buch nicht verfügbar sein sollte, können Sie eine andere, ähnliche Geschichte nachlesen (siehe Lösungen).

Stellen Sie den *Vergleich* zwischen dem Spiel und einer Messung in Form einer *Tabelle* dar. Ein paar Stichworte genügen.

Im Moment scheint am Messprozess nichts Spektakuläres zu sein. Das wird sich gleich *ändern*.

Erwin Schrödinger, ein berühmter Quantenphysiker, hat 1935 das Sonderbare am Messprozess mit einem (leider) makabren *Gedankenexperiment* veranschaulicht:

“Eine *Katze* wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender *Höllmaschine* (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss)...” (siehe Figur 3.1 auf der nächsten Seite). Diese Maschine enthält schwere Atome, die von sich aus in leichtere Atome zerfallen können (*radioaktive Atome*). Der *Zeitpunkt* eines Zerfalls ist *zufällig*. Hier haben wir ein typisches *Quantenverhalten*. Von den radioaktiven Atomen sind “*so wenig*” vorhanden, “dass im Lauf einer Stunde *vielleicht* eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines.” Sobald ein Atom zerfällt, wird das Ereignis durch ein geeignetes *Gerät* registriert. Das Gerät überträgt dann das Signal auf “ein *Hämmerchen*, das ein *Kölbchen* mit Blausäure zertrümmert [ein tödliches Gift]. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen: Die Katze *lebt* noch, wenn inzwischen *kein*

Atom zerfallen ist. Der *erste Atomzerfall* würde sie *vergiftet* haben.” (Baumann 84, Kapitel 5, Originaltext von Schrödinger)

Zunächst hat der Beobachter noch nicht in die Kammer geschaut. Dann meinen wir, die Katze sei *entweder tot oder lebendig*. *Falsch!*

Das *Leben* der Katze hängt davon ab, ob ein Atom *zerfällt* oder nicht.

Den Zerfall eines Atoms können wir mit einem *Doppelspaltversuch* vergleichen. Beim Doppelspalt kann ein Quantenobjekt *zwei mögliche Wege* durchlaufen (sowohl den ersten als auch den zweiten Spalt). Wir interpretieren das Quantenobjekt als eine Welle. Die Welle wählt nicht den einen oder anderen Weg, sondern eine *Überlagerung* von beiden.

Genauso ist es beim radioaktiven Atom. Das Atom kann in zwei verschiedenen Zuständen vorliegen:

1) zerfallen

2) nicht zerfallen

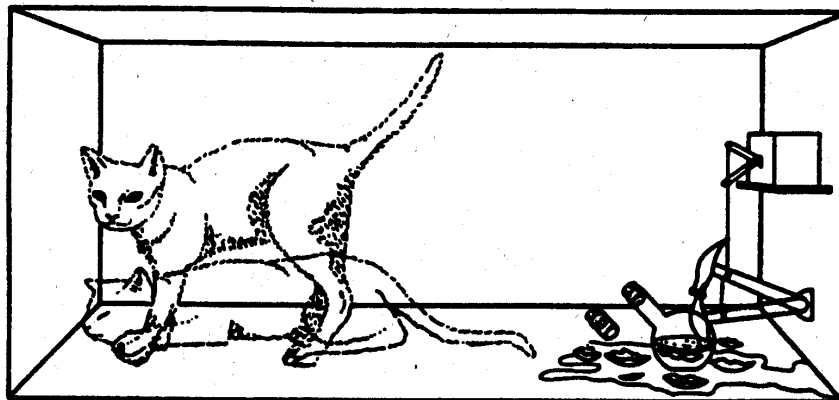
Die Zustände **1)** und **2)** entsprechen den beiden möglichen Wegen beim Doppelspaltversuch. Das radioaktive Atom ist *auch eine Welle*: hier *überlagern sich* die Zustände **1)** und **2)**. Also befindet sich auch die *Katze* in einer Überlagerung von zwei Zuständen:

1) tot

2) lebendig

Die Katze bildet also mit dem Atom und allen vorhandenen Geräten zusammen ein *gewaltiges Quantenobjekt*. Dieses tritt als *Welle* in Erscheinung.

Und vor allem: Die Katze ist *erst dann* tot oder lebendig, wenn der Beobachter *hineinschaut*.



Figur 3.1: Das *Gedankenexperiment* von *Schrödinger* (Zeichnung nach (DeWitt 70)). Die eingeschlossene Katze befindet sich in einer Überlagerung zweier Zustände, nämlich von *Tod* und *Leben*.



Was hat die *Überlagerung* einer toten und lebendigen Katze für einen *Sinn*? In der Kammer ereignen sich doch *seltsame* Dinge.

Es "spukt" also doch bei den Quanten!

Und die "Gespenster" sind so *gross* wie eine Katze!



Aufgabe 3.2: Wir beobachten die Katze

Im obigen Gedankenexperiment wird beschrieben, was sich in der Stahlkammer *vor der Beobachtung* abspielt.

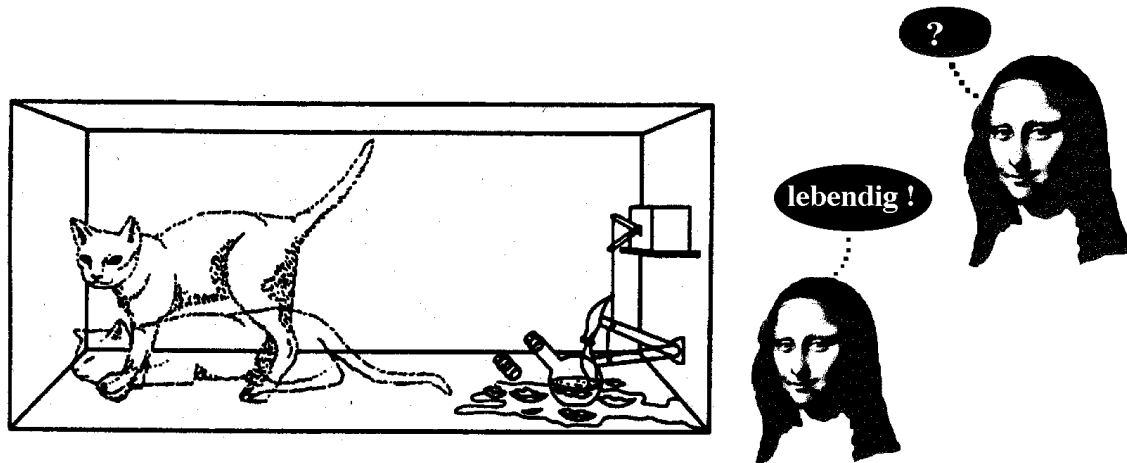
a) Beschreiben Sie, wie sich der Inhalt der Stahlkammer *im Zeitpunkt der Beobachtung* verändert.

b) Wir nehmen an, dass ein *Mensch* anstelle der Katze in der Kammer eingesperrt wird. Dieser kommt nach dem Experiment *lebend* heraus und teilt dem Versuchsleiter seine Eindrücke während des Versuchs mit. Der Versuchsleiter erläutert ebenfalls den Ablauf des Versuchs aus seiner Sicht. Notieren Sie einen *möglichen Dialog* in etwa 4 kurzen Sätzen.

Gemäss Teil b) der Aufgabe 3.2 *widersprechen* die Aussagen der Versuchsperson denjenigen der Quantentheorie. Und dieser Widerspruch beschränkt sich *nicht etwa auf atomare Objekte*. Wir finden nirgendwo eine *Grenze* zwischen dem Quantenobjekt und dem Messgerät. Schritt für Schritt *erobert* die Quantenwelt immer grössere Objekte, bis hin zum *Menschen*. Die unverschämten "Gespenster" treten im *täglichen Leben* auf!

Hinter dem Gedankenexperiment mit der Katze versteckt sich noch ein *weiteres Problem*. Bei der Beobachtung erfährt *nur der Beobachter* den Ausgang des Experiments. Für einen *anderen Menschen* schwebt die Katze noch immer zwischen Leben und Tod. Dieser Umstand wird in der Figur 3.2 veranschaulicht.

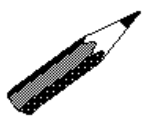
Eine Beobachterin A *beobachtet* die Katze. Eine Beobachterin B *fragt* die Beobachterin A, was sie gesehen hat. Sobald A *antwortet*, vollzieht sich für B zugleich eine Beobachtung *an der Stahlkammer und an der Beobachterin A*. Für B ist nämlich A ein *Teil* des Experiments. Wenn sich nun ein dritter Beobachter (C) bei B erkundigt, fängt das ganze Spiel von vorne an. So mag es *ohne Ende* weitergehen.



Figur 3.2: Die Beobachterin B vollzieht ihre Beobachtung zugleich *an der Stahlkammer und an der Beobachterin A* (Zeichnung der Kammer nach (DeWitt 70)).

Nun wissen Sie, welche *Schwierigkeiten* das Gedankenexperiment von Schrödinger mit sich bringt. Am wichtigsten ist wohl, dass wir mit der *Überlagerung* einer toten und einer lebendigen Katze wenig anfangen können.

Gewiss machen Sie sich nun Gedanken, wie man das Gedankenexperiment von Schrödinger *interpretieren* soll. Zu dieser Frage weiss noch heute *niemand* die Antwort. Hingegen gibt es originelle Ideen. Jeder Interpretation kommt eine gewisse *Berechtigung* zu.



Aufgabe 3.3: Zur Interpretation

Diese Aufgabe sollen Sie bei einer *günstigen Gelegenheit* ausführen.

Sie sollen einige Gedanken zum Thema mit einem interessierten Lehrer austauschen können. Wenden Sie sich wenn möglich an Ihre *Philosophielehrerin* oder an Ihren *Philosophielehrer*.

- a) Erklären Sie Ihrem Gesprächspartner das *Gedankenexperiment* in einfachen Worten.
- b) Tauschen Sie Ihre *Ideen* aus und halten Sie schliesslich das *Resultat* der Diskussion in wenigen Stichworten fest.

Mittlerweile können Sie ruhig weiterlesen.

3.2 Verschiedene Interpretationen

Es gibt mehrere *Vorschläge*. Nicht alle Ideen scheinen *vernünftig* zu sein. Wird man je ein geeignetes *Experiment* finden können, um irgendeiner dieser Theorien den *Vorrang* zu geben?

Wir wissen heute noch wenig darüber. Sicher ist nur: Solange sich eine Theorie nicht mit den bewährten *Hilfsmitteln der Naturwissenschaften* überprüfen lässt, kann man über *alles* diskutieren. Wir befinden uns auf dem Gebiet der *Philosophie*.

In diesem Sinne betrachten wir zum Abschluss *drei* mögliche Interpretationen des Gedankenexperiments von Schrödinger. Wir gehen aus von drei verschiedenen philosophischen Standpunkten:

1. Der methodische Positivismus

Wir können nur das *wissen*, was wir *beobachten*. Es hat keinen Sinn, über eine *unabhängige Wirklichkeit* zu sprechen. Über unbekannte Dinge muss man *schweigen*. Eine Beobachtung hängt zwar von der *Sinneswahrnehmung* des Beobachters ab, ist aber *für jeden Beobachter* dieselbe. In unserem Gedankenexperiment sind sich alle Beobachter und sogar die Katze über das Resultat des Experiments einig. Es *interessiert niemanden*, wie die Situation *vor einer Beobachtung* aussah.

2. Das Bewusstsein organisiert die Materie

Experiment und Beobachter sind *untrennbar*. Im Moment einer Messung wird das Resultat dem Beobachter *bewusst*. Die schlagartige Änderung des *Bewusstseinszustands* bewirkt sogleich eine Änderung im *Experiment*. Das Bewusstsein des Beobachters *beeinflusst* das *Quantenobjekt*. Die ganze Welt wird somit vom *Bewusstsein* geprägt. (Ausserdem kann der Mensch seinen *Willen* auf diese Weise in *Tat* umsetzen.)

Vielleicht lässt sich die Welt zusätzlich von einer "*äusseren Wirklichkeit*" (also unabhängig von uns) beeinflussen. Diese Wirklichkeit ist dann aber von *geistiger Natur* (z.B. Gott).

Im Falle unseres *Katzenexperiments* greift das Bewusstsein des Beobachters ins *Leben* der Katze ein.

Von einigen Physikern wird der obige Gedanke noch weitergesponnen: In jedem Experiment gibt es eine ganze *Kette* von Messvorrichtungen. Jede Vorrichtung beobachtet die vorherige. Den Anfang der Kette bildet ein Quantenobjekt, das sich in einer Überlagerung von Zuständen befindet. In unserem Katzenexperiment ist das ein radioaktives Atom. Darauf folgt eine Reihe von Einrichtungen, darunter ein Messgerät für den Atomzerfall, ein Hämmerchen und ein Kölbchen mit Gift. Am Schluss der Kette muss sich ein Mensch mit seinem Bewusstsein befinden, damit die *Überlagerung von Zuständen* wieder verschwinden kann. Auch die modernste Videokamera mit Auto-Fokus und Zoom kann den Menschen nicht ersetzen. Aber vielleicht genügt schon die Katze dazwischen, oder gar eine Bakterie auf dem Boden? *Wo fängt das Bewusstsein an?*

3. Die Mehrfachwelten

In unserem Gedankenexperiment lebt die Katze in einer *geschlossenen* Kammer. Es ist deshalb einfach, eine Beobachtung *von aussen* durchzuführen. Anders sieht es aus, wenn das Katzenexperiment *nicht* in einer geschlossenen Kammer stattfindet. Dann wird unter Umständen das *ganze Universum* vom "Spuk" erfasst und verwandelt sich in eine Überlagerung von Zuständen. Wer soll dann die Aufgabe des *äusseren Beobachters* übernehmen?

Einige Physiker wollen dem Problem folgendermassen ausweichen. Bei einem Messprozess wird eine Überlagerung zweier Zustände nicht in *einen einzigen Endzustand* verwandelt (z.B. *tote* oder *lebendige Katze*). Vielmehr gibt es nach der Messung *zwei neue Welten*, die eine mit der *toten* und die andere mit der *lebendigen Katze*. Natürlich wissen die Welten nichts voneinander. Da bei uns viel gemessen wird, können Sie sich gut vorstellen, *wieviele Welten* neben der unseren existieren könnten. *Wieviele Kopien von Ihnen* mögen wohl jetzt in den anderen Welten leben?

Gegenwärtig werden *Katzenexperimente* durchgeführt. Doch *keine Angst!* Anstelle von Katzen nimmt man *grosse Atome*. Es ist durchaus denkbar, dass die Messergebnisse eines Tages *neue Hinweise* zu den obigen Interpretationen geben.

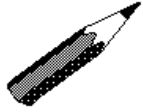
Es gäbe noch einiges über die *möglichen* Interpretationen zu berichten. Doch müssen wir nun einmal zu einem Ende kommen.

Für dieses Kapitel sollen nun Sie Ihre *eigene Zusammenfassung* schreiben. Blättern Sie zuerst zurück. Schauen Sie sich nochmals die *Lernziele* an. Schreiben Sie zu jedem Ziel in wenigen Zeilen auf, was Sie *gelernt* haben. Wahrscheinlich müssen Sie einige wichtigen Stellen des Kapitels nochmals anschauen. Für die Zusammenfassung sollten Sie mit *10 bis 15 Zeilen* auskommen.



Sie fassen zusammen:

Lernkontrolle



Aufgabe 3.4: Zum Gedankenexperiment von Schrödinger

Gemäss der Quantentheorie *widerspricht* der Zustand der Katze vor einer Beobachtung unseren Alltagsvorstellungen.

Erklären Sie in etwa 3 bis 4 Sätzen, weshalb dem so ist.



Aufgabe 3.5: Eine Interpretation des Katzenexperiments

Betrachten Sie *eine* der drei oben beschriebenen Interpretationen. Vielleicht wählen Sie diejenige, die Ihnen am besten gefällt.

a) *Beschreiben* Sie diese Interpretation in etwa zwei kurzen Sätzen. Ihre Beschreibung soll sich an Ihre kleine Schwester oder Ihren kleinen Bruder wenden.

b) Erklären Sie in etwa zwei weiteren Sätzen, weshalb diese Sichtweise das Sonderbare am Katzenexperiment *klären* könnte.

Wenn Sie sich sicher fühlen, können Sie sich zum Kapiteltest melden.

Lösungen zu den Aufgaben

Lösung 3.1: Das Spiel der "zwanzig Fragen"

Der *Vergleich* ist im Buch von Davies und Brown ausführlich angegeben. Für Ihre *Tabelle* können Sie sich danach richten.

Falls das Buch von Davies und Brown nicht verfügbar ist, können Sie stattdessen die folgende Geschichte lesen. Auch in diesem Fall erstellen Sie eine Vergleichstabelle.

Ein Dutzend Teilnehmer sitzen um einen Tisch mit einem Zeichenblatt in der Mitte. Nun ist Anna an der Reihe. Sie muss einen *Gegenstand zeichnen* und zugleich *erraten*. Langsam führt sie ihren Stift. Nacheinander gibt jeder einen Kommentar, und zwar entweder "*Ja, nur so weiter!*" oder "*Stop, in eine andere Richtung!*" Allmählich entsteht das Bild. Plötzlich kann sie es erkennen: "*Eine Ente!*" Doch hatten sich die anderen am Anfang *gar keinen Gegenstand* ausgedacht! Sobald jemand seinen Kommentar gab, musste er *irgendein Objekt* im Kopf haben. Sein Objekt musste nur mit der angefangenen Zeichnung *übereinstimmen*.

Welche Bedeutung hat diese Geschichte für die Quantenphysik?

Wir stellen uns oft vor, wir seien von vielen Teilchen umgeben, wie Elektronen, Protonen oder Atome, die *ohne Beobachtung* vor sich hin leben. Früher *glaubten* wir sogar, die Teilchen hätten jederzeit einen bestimmten Ort und einen bestimmten Impuls. Doch entsteht ein Teilchen erst *während einer Messung*. Genauso ist das Bild der Ente *schrittweise* entstanden. Hätte Anna den Stift an einer bestimmten Stelle abgehoben und an einem anderen Ort wieder angesetzt, so wäre das Ergebnis gewiss *anders* herausgekommen. Vielleicht wäre dann ein Hase entstanden. So ist es auch in der Quantenphysik. Das *Ergebnis* einer Messung hängt wesentlich von der *Art* der Messung ab. Allerdings hängt das Resultat ebenso sehr vom *gemessenen Objekt* ab. Auch in unserem Spiel haben die Mitspieler mit ihren Kommentaren Annas Hand *geführt*. So entsteht ein *unvorhersehbares Resultat*. Der Vergleich zwischen dem Spiel und der Quantenphysik hat zwar gewisse Schwächen. Aber er zeigt den Kern der Sache.

Lösung 3.2: Wir beobachten die Katze

a) *Vor der Beobachtung überlagern sich* in der Kammer *zwei Zustände* in Form einer Welle. Der eine Zustand enthält ein Atom vor dem Zerfall, ein unversehrtes Giftkölbchen und eine *lebende Katze*. Der andere Zustand enthält ein zerfallenes Atom, ein zerschlagenes Giftkölbchen und eine *tote Katze*.

Im Zeitpunkt der Beobachtung verschwindet plötzlich einer der beiden Zustände. Aus der geisterhaften Welle mit einer toten und einer lebenden Katze wird plötzlich *entweder* eine ganze lebende Katze, *oder* aber eine endgültig tote Katze.

Wenn Sie mit der Aufgabe a) jetzt noch Mühe haben, sollten Sie das Gedankenexperiment von Schrödinger noch einmal durchlesen. Danach schauen Sie sich die obige Lösung erneut an.

b) Sie können Ihren Dialog prinzipiell *frei* gestalten. Wir stellen uns dabei vor, dass Sie die *folgenden Punkte* erwähnen:

- Die eingesperrte Versuchsperson hat zwar um ihr Leben Angst gehabt, doch *fühlte sie sich* während der ganzen Zeit *wohlauf*.
- Vor seiner Beobachtung wusste der Versuchsleiter nichts über das Befinden der Versuchsperson. Für ihn gab es eine *wellenartige Überlagerung* eines *toten* und eines *lebenden* Menschen.
- *Erst nach der Beobachtung stimmten* die Eindrücke des Versuchsleiters mit denjenigen der Versuchsperson überein.

Lösung 3.4: Zum Gedankenexperiment von Schrödinger

Nach unseren Alltagsvorstellungen ist das radioaktive Atom in der Stahlkammer entweder zerfallen oder nicht zerfallen. Deshalb müsste die Katze vor einer Beobachtung entweder schon ganz tot oder noch ganz wohlauf sein. Das widerspricht der Aussage der Quantentheorie. Nach dieser Theorie befindet sich die Katze am Ende des Versuchs *weder im toten, noch im lebendigen* Zustand. Sie befindet sich in einer *Überlagerung* der beiden Zustände. Weil sich auch das Atom in einer *Überlagerung* zweier Zustände befindet. Diesen Widerspruch gibt es so lange, bis ein Beobachter in die Kammer schaut.

Lösung 3.5: Eine Interpretation des Katzenexperiments

In dieser Aufgabe müssen Sie *eine* der *drei* vorgeschlagenen Interpretationen betrachten. Wir geben hier kurze Anhaltspunkte für zwei der drei Interpretationen.

Erstes Beispiel: Das Bewusstsein organisiert die Materie.

- a) Gewisse kleinste Objekte lassen sich nur beobachten, wenn jemand hinschaut. Das Aussehen des Objekts wird vom Bewusstsein des Beobachters beeinflusst.
- b) Durch das Bewusstsein verschwindet eine Überlagerung von Zuständen (Beobachtungsprozess). Die Überlagerung von Zuständen können wir gar nicht wahrnehmen.

Zweites Beispiel: Die Mehrfachwelten.

- a) Gewisse kleinste Objekte können verschiedene Erscheinungsformen annehmen, wenn man Sie beobachtet. Jede dieser Erscheinungsformen lebt für sich in einer eigenen Welt weiter: Es bilden sich mehrere, leicht verschiedene Welten.
- b) In jeder neu entstandenen Welt sieht man nur eine von mehreren Erscheinungsformen. Von den anderen Welten mit den anderen Erscheinungsformen weiss man nichts.

Anhang 1: Tests und Lösungen

Test für Kapitel 1

Test-Aufgabe 1.1: Experiment mit Neutronen

Im Kapitel 1 haben Sie ein *Interferenzexperiment mit Neutronen* kennengelernt. *Beschreiben* Sie es in etwa 3 Sätzen.

Test-Aufgabe 1.2: Wasserinterferenzen einmal anders

Wassermoleküle (H_2O) haben eine Masse von $3.0 \cdot 10^{-26}$ kg. Man möchte sie an einem *Lichtgitter* mit dem Gitterabstand 100 nm (mit UV-Licht) beugen. Um ein schönes Interferenzbild zu ergeben, soll der Gitterabstand rund 10000 mal die Wellenlänge eines Moleküls sein.

Welche *Geschwindigkeit* müssen die Moleküle haben? ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s)

Test-Aufgabe 1.3: Natrium-Atome

Natrium-Atome werden von den Physikern meistens als "*Teilchen*" betrachtet.

- Stimmt diese Betrachtungsweise auch beim *Interferenzexperiment* mit Natrium-Atomen? *Begründen* Sie Ihre Antwort.
- Im Interferenzexperiment wurden zwei Intensitätsmaxima beobachtet. Was lässt sich über den *erwarteten Ankunftsort* eines *einzelnen* Atoms vorhersagen?

Test-Aufgabe 1.4: Interferenzen mit "Luft"

Die Stickstoffmoleküle (N_2) der Luft haben eine Masse von $4.7 \cdot 10^{-26}$ kg. Man möchte sie an einem *Lichtgitter* mit dem Gitterabstand 260 nm (mit grünem Licht) beugen. Um ein schönes Interferenzbild zu ergeben, soll der Gitterabstand rund 10000 mal die Wellenlänge eines Moleküls sein.

Welche *Geschwindigkeit* müssen die Moleküle haben? ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s)

Lösungen zum Test für Kapitel 1

Test-Aufgabe 1.1: Experiment mit Neutronen

Die Neutronen werden an einem *Doppelspalt* aus absorbierenden Materialien (spezielles Glas und Bor) gebeugt. Nach erfolgter Beugung bilden die Neutronen ein *Interferenzbild* mit zahlreichen Maxima und Minima (Nachweis mit einem Neutronen-Detektor). Sowohl die *Verstärkungs-* als auch die *Auslöschungseffekte* verschwinden, wenn man einen Spalt zudeckt. (K2)

Test-Aufgabe 1.2: Wasserinterferenzen einmal anders

Die Moleküle müssen die Wellenlänge $\lambda = 10^{-11}$ m haben. Aus der *Beziehung von de Broglie* bekommt man für die Geschwindigkeit v :

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m} = 2200 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (\text{K3})$$

Test-Aufgabe 1.3: Natrium-Atome

a) Die "Teilchenbetrachtung" ist bei Interferenzerscheinungen nicht zutreffend. Die Atome breiten sich trotz ihrer Masse wie Wellen aus. Erst im Detektor tritt das Teilchenverhalten in Erscheinung. (K2)

b) An den Orten der Intensitätsmaxima trifft ein einzelnes Atom je nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein. Die grösste Wahrscheinlichkeit wird beim grössten Maximum erreicht. (K4)

Test-Aufgabe 1.4: Interferenzen mit "Luft"

Die Stickstoffmoleküle müssen die Wellenlänge $\lambda = 2.6 \cdot 10^{-11}$ m haben. Aus der *Beziehung von de Broglie* bekommt man für die Geschwindigkeit v :

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m} = 540 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Test für Kapitel 2

Test-Aufgabe 2.1: Einstein gegen die Quantentheorie

Mit ihrem *Gedankenexperiment* wollten Einstein, Podolsky und Rosen die Schwachstellen der Quantentheorie aufdecken. Welche beiden *Hauptargumente* brachten sie vor? Schreiben Sie dazu *höchstens 3-4 Sätze* auf.

Test-Aufgabe 2.2: Das Experiment nach Franson

- a) Welche wichtige *Eigenschaft* der Quantenobjekte wurde mit diesem Experiment nachgewiesen? (Es muss ein Experiment dieser Art für den Nachweis erforderlich sein.)
- b) Weshalb muss jede Hypothese verworfen werden, die dieser Eigenschaft widerspricht?

Test-Aufgabe 2.3: Ein Raubüberfall

Zwei Zwillingräuber, Toni und Robi, erbeuten *eine Million Dollar* in einer Bank. Als bald machen sich die beiden in *entgegengesetzten Richtungen* davon, jeder mit seinem Auto und einem Sack voll Geld. Die Polizei wird sofort alarmiert, doch *niemand weiss*, wieviel Geld jeder Räuber bei sich hat. Dazu muss die Polizei z.B. Tonis Wagen stoppen. Dann weiss sie, wieviel Geld bei *Toni* zu finden ist. Zugleich weiss sie, wieviel Geld bei *Robi* zu finden ist. Diese Situation ist ähnlich wie beim Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen. Die beiden Geldsummen ergeben nämlich zusammen einen festen Gesamtbetrag.

Geben Sie den *wichtigsten Unterschied* an zwischen dieser Geschichte und dem Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen. Es geht vor allem darum, was mit dem Geld geschieht. Die genaue Aufteilung der Geldsumme soll als nebensächlich gelten.

Test-Aufgabe 2.4: Zum Gedankenexperiment

Beschreiben Sie in *etwa zwei Sätzen* die Bedingungen, welche das Teilchenpaar im *Gedankenexperiment* von Einstein, Podolsky und Rosen erfüllen muss. Ihre Beschreibung muss für Ihre Tante oder Ihren Onkel *verständlich* sein.

Lösungen zum Test für Kapitel 2

Test-Aufgabe 2.1: Einstein gegen die Quantentheorie

- 1) Im Gedankenexperiment sollten verschränkte Teilchen so voneinander *isoliert* werden, dass das eine Teilchen nicht infolge einer Messung das andere beeinflussen konnte. Wegen der *Verschränkung* gerät ein solches System in *Widerspruch* mit der Unbestimmtheitsbeziehung.
- 2) Bei jeder Messung beeinflusste das eine Teilchen unverzüglich (d.h. mit *unendlicher Geschwindigkeit*) das andere Teilchen. Dabei ist die *Lichtgeschwindigkeit* die höchst mögliche Übertragungsgeschwindigkeit. (K2)

Test-Aufgabe 2.2: Das Experiment nach Franson

- a) Quantenobjekte verhalten sich *nicht-lokal*. (K1)
- b) Im Experiment gab es zuweilen *mehr Koinzidenzen*, als nach lokalen Theorien zu erwarten war. Damit wurden sämtliche *lokalen Theorien* verworfen. (K2)

Test-Aufgabe 2.3: Ein Raubüberfall

Bei dieser Räubergeschichte hat jeder Räuber seinen Geldanteil bei sich, lange bevor er von der Polizei gestoppt werden kann. Die Anteile sind auch dann festgelegt, wenn niemand nachzählt (*verborgene Eigenschaft*). Toni und Robi haben sich das Geld geteilt, bevor sie sich getrennt haben (*lokales Verhalten*). *Nicht so* beim Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen. Dort steht das Ergebnis für beide Teilchen erst bei einer Messung fest (*nicht-lokales Verhalten*). Das Ergebnis ist unvorhersagbar (*keine verborgene Eigenschaft*). (K4)

Test-Aufgabe 2.4: Zum Gedankenexperiment

Für beide Teilchen nehmen wir gleiche Massen an. Sooft man ihre Geschwindigkeiten misst, sind diese entgegengesetzt gerichtet und von gleichem Betrag. Sooft man ihre Aufenthaltsorte misst, sind diese gleich weit vom Entstehungsort entfernt und befinden sich auf entgegengesetzten Seiten (von ihm aus gesehen). (K2)

Test für Kapitel 3

Test-Aufgabe 3.1: Das Gedankenexperiment von Schrödinger

Beschreiben Sie in ca. 3 Sätzen (mit *Begründung*), in welchem Zustand sich die Katze kurz vor einer Beobachtung befindet.

Test-Aufgabe 3.2: Interpretationen

Betrachten Sie *zwei* mögliche Interpretationen des Gedankenexperiments von Schrödinger, welche im Kapitel 3 vorgeschlagen worden sind.

a) *Fassen* Sie beide je in 1-2 Sätzen *zusammen*.

b) Erscheint Ihnen die eine oder die andere der beiden Interpretationen *glaubwürdig* oder *unglaubwürdig*? Geben Sie dazu *je ein Argument* an.

Lösungen zum Test für Kapitel 3

Test-Aufgabe 3.1: Das Gedankenexperiment von Schrödinger

Kurz vor einer Beobachtung befindet sich die Katze *weder im toten, noch im lebendigen* Zustand. Sie befindet sich in einer *Überlagerung* der beiden Zustände. Der Gesundheitszustand der Katze hängt nämlich vom Zustand eines radioaktiven Atoms ab und bildet mit diesem und den übrigen Geräten zusammen ein *gewaltiges Quantenobjekt*. (K2)

Test-Aufgabe 3.2: Interpretationen

In dieser Aufgabe müssen *zwei* der *drei* in Kapitel 3 vorgeschlagenen Interpretationen *beurteilt* werden.

a) Zwei Beispiele:

Erstes Beispiel: Das Bewusstsein organisiert die Materie.

Das Resultat einer Messung an einem Quantenobjekt wird vom Bewusstsein des Beobachters geprägt. Erst durch das Bewusstsein kann eine Überlagerung von Zuständen verschwinden.

Zweites Beispiel: Die Mehrfachwelten.

Nach jeder Messung gibt es so viele *neue Welten*, wie sich vorher *Zustände überlagert* haben: In jeder Welt entwickelt sich eines der Zustände weiter. Damit können *sehr viele Welten* neben der unseren existieren. (K2)

b) Diese Teilaufgabe kann *weder richtig noch falsch* beantwortet werden. Die Schülerin gibt ihrem Urteil freien Lauf. Es soll aber auf eine *folgerichtige Argumentation* geachtet werden. (K6)

Test für das gesamte Leitprogramm

Test-Aufgabe 1: Wasserinterferenzen einmal anders

Wassermoleküle (H_2O) haben eine Masse von $3.0 \cdot 10^{-26}$ kg. Man möchte sie an einem *Lichtgitter* mit dem Gitterabstand 100 nm (mit UV-Licht) beugen. Um ein schönes Interferenzbild zu ergeben, soll der Gitterabstand rund 10000 mal die Wellenlänge eines Moleküls sein.

Welche *Geschwindigkeit* müssen die Moleküle haben? ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s)

Test-Aufgabe 2: Das Experiment nach Francon

- a) Welche wichtige *Eigenschaft* der Quantenobjekte wurde mit diesem Experiment nachgewiesen?
- b) Weshalb muss jede Hypothese verworfen werden, die dieser Eigenschaft widerspricht?

Test-Aufgabe 3: Interpretationen

Betrachten Sie *zwei* mögliche Interpretationen des Gedankenexperiments von Schrödinger, welche im Kapitel 3 vorgeschlagen worden sind.

- a) *Fassen* Sie beide je in 1-2 Sätzen *zusammen*.
- b) Erscheint Ihnen die eine oder die andere der beiden Interpretationen *glaubwürdig* oder *unglaubwürdig*? Geben Sie dazu *je ein Argument* an.

Lösungen zum Test für das gesamte Leitprogramm

Test-Aufgabe 1: Wasserinterferenzen einmal anders

Die Moleküle müssen die Wellenlänge $\lambda = 10^{-11}$ m haben. Aus der *Beziehung von de Broglie* bekommt man für die Geschwindigkeit v :

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m} = 2200 \frac{\text{m}}{\text{s}} . \quad (\text{K3})$$

Test-Aufgabe 2: Das Experiment nach Franson

- a) Quantenobjekte verhalten sich *nicht-lokal*. (K1)
- b) Im Experiment gab es zuweilen *mehr Koinzidenzen*, als nach lokalen Theorien zu erwarten war. Damit wurden sämtliche *lokalen Theorien* verworfen. (K2)

Test-Aufgabe 3: Interpretationen

In dieser Aufgabe müssen *zwei* der *drei* in Kapitel 3 vorgeschlagenen Interpretationen *beurteilt* werden.

a) Zwei Beispiele:

Erstes Beispiel: Das Bewusstsein organisiert die Materie.

Das Resultat einer Messung an einem Quantenobjekt wird vom Bewusstsein des Beobachters geprägt. Erst durch das Bewusstsein kann eine Überlagerung von Zuständen verschwinden.

Zweites Beispiel: Die Mehrfachwelten.

Nach jeder Messung gibt es so viele *neue Welten*, wie sich vorher *Zustände überlagert* haben: In jeder Welt entwickelt sich eines der Zustände weiter. Damit können *sehr viele Welten* neben der unseren existieren. (K2)

b) Diese Teilaufgabe kann *weder richtig noch falsch* beantwortet werden. Die Schülerin gibt ihrem Urteil freien Lauf. Es soll aber auf eine *folgerichtige Argumentation* geachtet werden. (K6)

Anhang 2: Bibliothek für die Schüler

- (Audretsch 90) Audretsch, J. und Mainzer, K. (Eds.): Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? Mannheim usw. 1990 (BI Wissenschaftsverlag).
Verwendung in Kapitel 1 (Kopien).
- (Davies 93) Davies, P. C. W. und Brown, J. R.: Der Geist im Atom. Frankfurt a. M. und Leipzig 1993 (Insel). *Verwendung in Kapitel 3.*

Anhang 3: Experimentiermaterial und Computer-Simulationen

Computer-Simulationen zum Kapitel 1:

Benötigtes Material:

Für die Simulationen 1.1 und 1.2 wird ein Computer mit einem Internet-Anschluss und der üblichen Software (z.B. NetScape) benötigt. Beide Simulationen können von der folgenden Internet-Seite aus gefunden werden (zur freien Verfügung):

didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/home/java3.html

Diese Seite enthält eine Liste von Simulationstiteln. Unsere Simulationen sind gegen den Schluss des Abschnitts "**Atom- Kernphysik**" zu finden. Es müssen die folgenden Zeilen gewählt werden:

<i>Simulation</i>	<i>Zeile zum Anklicken</i>	<i>Thema</i>
Simulation 1.1	<u>Two Slits 2 mit Doppelspalt Interferenz</u>	Interferenzen am Doppelspalt
Simulation 1.2	<u>Two Slits 3 mit Photoneninterferenz - statistisch</u>	Interferenzen mit Elektronen

Diese Simulationen sind einfach zu verwenden und selbsterklärend. Sie können *online* gestartet werden.

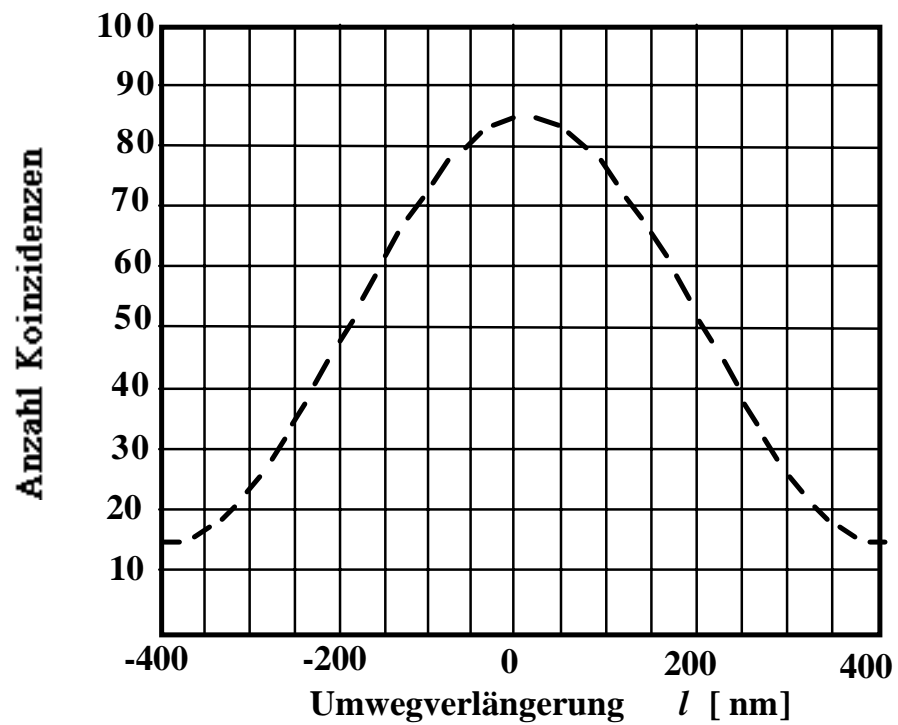
Die Kommentare sind auf *Englisch*.

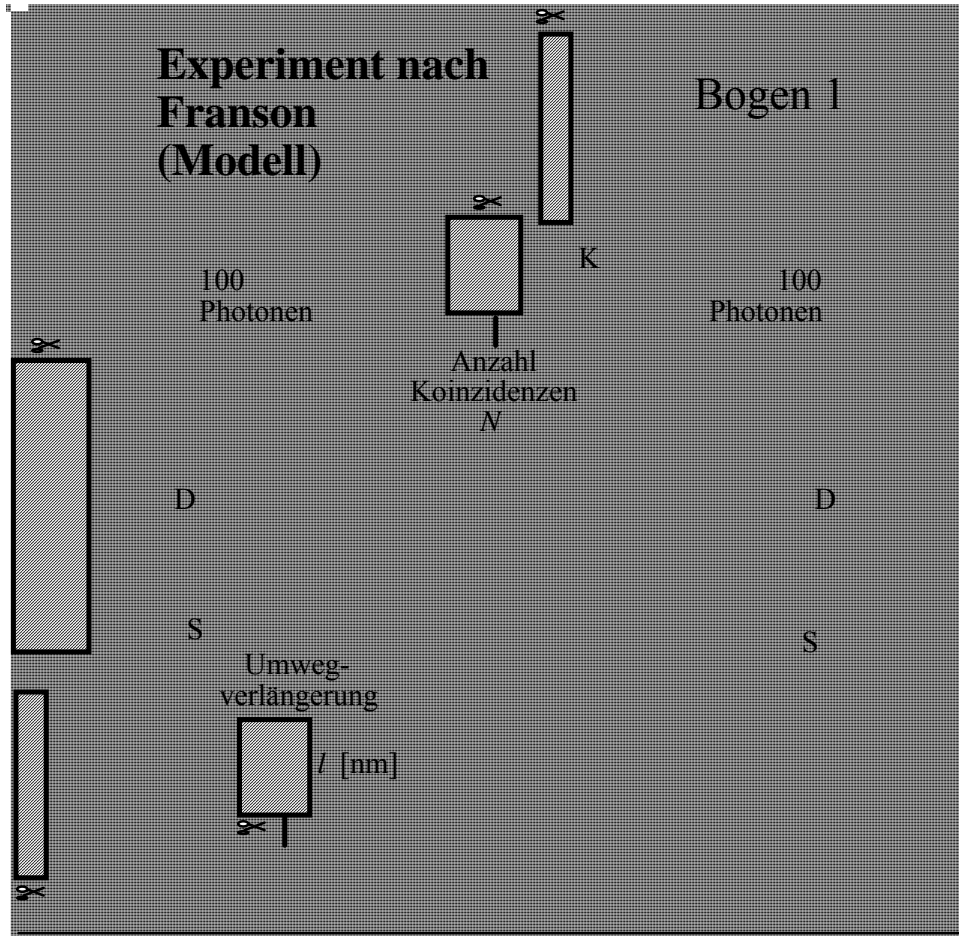
Modellexperiment 2.1: Experiment nach Franson

Benötigtes Material:

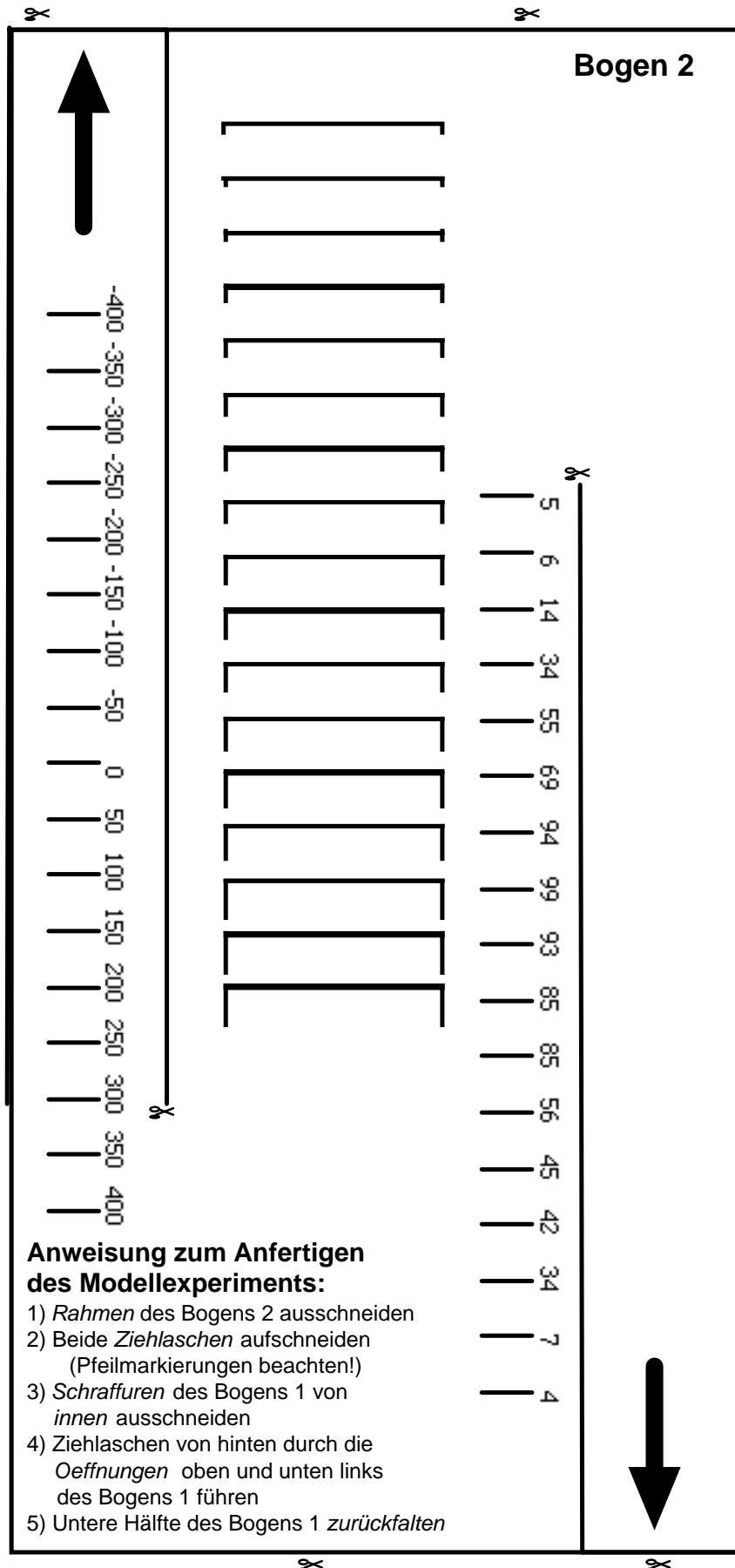
- 2 vorgedruckte, *dünne Kartonbögen* und 1 *Graphik* pro Person
- *Scheren*

Graphik:





Hier zurückfallen!



Anhang 4: Von den Autoren benutzte Quellen:

Als Grundlage benutzte Quellen:

- (Audretsch 90) Audretsch, J. und Mainzer, K. (Eds.): Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? Mannheim usw. 1990 (BI Wissenschaftsverlag).
- (Baumann 84) Baumann, K. und Sexl, U. R.: Die Deutungen der Quantentheorie. Braunschweig 1984 (Vieweg).
- (Baumann 95) Baumann, F., Baumgartner, W., Dreyer, H. P., Dünki, R., Ehrismann, P., Heeb, R., Kaufmann, A., Kocheisen, M.: Kann man Atome sehen? (Leitprogramm zur Quantenphysik). Zürich 1995 (ETH).
- (Chiao 93) Chiao, R. Y., u.a.: Schneller als Licht? In: Spektrum der Wissenschaft. **10** (1993) 40-49.
- (Davies 93) Davies, P. C. W. und Brown, J. R.: Der Geist im Atom. Frankfurt a. M. und Leipzig 1993 (Insel).
- (DMK/DPK 84) Formeln und Tafeln Mathematik - Physik, DMK / DPK. Zürich 1984 (Orell Füssli).
- (Kuhn 92) Kuhn, W.: Physik, Band 2, 12/13. Braunschweig 1992 (Westermann).
- (Mandl 88) Mandl, F., Shaw, G.: Quantum Field Theory. Chichester 1988 (Wiley and Sons).
- (Schlögl 99) Schlögl, F.: Aspekte zu den "spukhaften Quanten-Korrelationen". In: Praxis der Naturwissenschaften / Physik. **8** (1999) 2-11.

Zitierte Quellen:

- (Audretsch 90) Audretsch, J. und Mainzer, K. (Eds.): Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? Mannheim usw. 1990 (BI Wissenschaftsverlag).
- (Baumann 84) Baumann, K. und Sexl, U. R.: Die Deutungen der Quantentheorie. Braunschweig 1984 (Vieweg).
- (DeWitt 70) DeWitt, S. B.: Quantum mechanics and reality. In: Physics today **23** (1970) 9.

Anhang 5: Hinweise für die Lehrperson

Das vorliegende Leitprogramm kann entweder als kurzes, *eigenständiges Leitprogramm* (**Versio**n** 1**) oder als *Additum* (**Versio**n** 2**) zu einem bestehenden Leitprogramm über Quantenphysik verwendet werden.

Das Leitprogramm wurde in *drei völlig getrennten Kapiteln* gestaltet.

Kapitel 1 und 2 können als *Fundamentum* der **Versio**n** 1** verwendet werden.

Kapitel 3 kann in der **Versio**n** 1** als *Additum* eingesetzt werden. Dabei kann für das Kapitel 3 auf einen Kapiteltest verzichtet werden.

In der **Versio**n** 2** können *alle drei Kapitel* oder auch nur die *ersten beiden* verwendet werden.

Auch hier ist ein Kapiteltest für das Kapitel 3 nicht unbedingt erforderlich.

Im *Test für das gesamte Leitprogramm* ist je eine Aufgabe aus jedem Kapiteltest ausgewählt worden.

Im Rahmen von Erprobungen dienen verschiedenartige Rückmeldungen der laufenden Überarbeitung des Textes. Anonyme Umfragen geben insbesondere Aufschluss über die formale Qualität des Leitprogramms. Erhebungen werden jederzeit dankbar entgegen-
genommen. Dabei kann zum Beispiel der folgende Umfragebogen verwendet werden.