

Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik¹

Hartmut Wiesner und Rainer Müller

Einleitung

Der Unterricht der Quantenmechanik in der Schule hat mit zwei großen Schwierigkeiten zu kämpfen: Zum einen ist der mathematisch-formale Aufwand schon bei der Berechnung der einfachsten Probleme so groß, daß man zu Abschätzungen und heuristischen Verfahren greifen muß, um überhaupt zu relevanten Ergebnissen zu gelangen. Als Beispiel wurden in einem vorangegangenen Artikel [1] verschiedene Verfahren zur Ermittlung der Energieniveaus im Wasserstoffatom vorgestellt. Auf der anderen Seite stehen die Interpretationsfragen, die Schüler und Lehrer vielleicht vor noch größere Probleme stellen. Betrachtet man etwa die Kopenhagener Interpretation (s. z. B. [2]), die eine weite Verbreitung gefunden hat, so findet man sich vor einem ganzen erkenntnistheoretischen System, das in seiner beeindruckenden Komplexität allerdings keine Antworten gibt, die sich in wenigen Sätzen ausdrücken lassen. Erschwerend kommt hinzu, daß sich die Wissenschaft trotz ihres immensen empirischen Erfolgs keineswegs über die richtige Deutung der Quantenmechanik einig ist. Im Grunde müßten daher viele Interpretationsaussagen mit dem Hinweis „gilt bezüglich einer bestimmten Deutung“ versehen werden.

Es wäre daher sicher erfreulich, wenn man eine Interpretation der Quantenmechanik fände, die einfach zu lehren und zu lernen ist, deren Aussagen aber trotzdem von der großen Mehrzahl der Fachphysiker akzeptiert werden können. Und in der Tat gibt es mit der *Statistischen* oder *Ensembleinterpretation* eine solche Deutung, die eine Art „Minimalinterpretation“ der Quantenmechanik darstellt. Im Grunde läßt sich ihre Aussage zusammenfassen in dem Satz: „Die statistischen Aussagen der Quantenmechanik beziehen sich nicht auf ein Einzelsystem, sondern auf ein statistisches Ensemble von identisch präparierten Systemen“. Sie ist minimal in dem Sinne, daß ihre Sprache direkt dem Vorgehen der Experimentalphysiker und ihren Ergebnissen angepaßt ist, die sich in der Quantenmechanik immer auf Häufigkeitsverteilungen bestimmter Observablen in statistischen Gesamtheiten beziehen. Im folgenden sollen die geschichtliche Entwicklung, die Bedeutung und die Geltung der Statistischen Interpretation deutlich gemacht und ihre mögliche Rolle im Schulunterricht beleuchtet werden.

Die Entstehung der Statistischen Interpretation

Die historischen Wurzeln der Statistischen Interpretation lassen sich bis zur 5. Solvay-Konferenz im Oktober 1927 zurückverfolgen, bei der die damals führenden Physiker über die Interpretation der gerade entwickelten Quantenmechanik diskutierten. In unserem Zusammenhang interessant ist der offizielle Beitrag von Einstein, der lediglich in einer kritischen Bemerkung in der Abschlußdiskussion zum Problem der „Reduktion des Wellenpakets“ bestand. (Weitaus bekannter wurden seine Diskussionen, die er bei dieser Gelegenheit mit Bohr über „erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik“ führte und die dieser erst viele Jahre später aus dem Gedächtnis niederschrieb [3].)

Einstein betrachtete das folgende Gedankenexperiment (Abb. 1): Ein Strahl von Elektronen trifft senkrecht auf einen Schirm mit einer kleinen Öffnung, hinter dem ein halbkugelförmiger fotografischer Film angebracht ist. Die zum Strahl gehörige Wellenfunktion wird am Spalt in

¹Physik in der Schule **34**, **343**, **379** (1996)

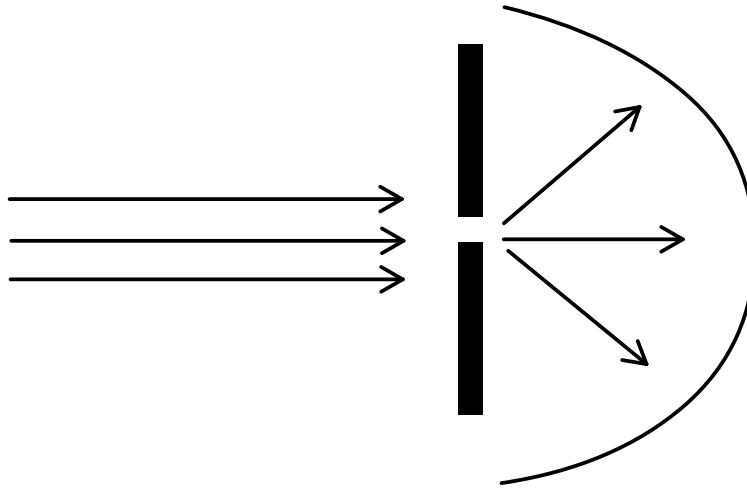


Abbildung 1: Gedankenexperiment von Einstein

eine Kugelwelle gestreut. Damit ist auf der Photofläche kein Punkt vor dem anderen bevorzugt. Er unterschied dann zwei mögliche Sichtweisen ([6], zit. nach [5]):

1. „Die deBroglie-Schrödinger-Wellen entsprechen nicht einem einzelnen Elektron, sondern einer im Raum ausgedehnten Elektronenwolke. Die Theorie gibt keine Information über die individuellen Prozesse, sondern nur über das Ensemble einer Unendlichkeit von Elementarprozessen.“
2. „Die Theorie hat den Anspruch, eine vollständige Theorie individueller Prozesse zu sein.“

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

Faßt man die Quantenmechanik als vollständige Beschreibung des Einzelsystems auf, wird man also gezwungen die Reduktion der Wellenfunktion einzuführen, und es stellt sich die Frage, wann und wo sie erfolgt. Diese Frage ist Gegenstand der Theorie der quantenmechanischen Messung, auf die in einem der folgenden Artikel eingegangen werden soll. Empirisch führen die beiden obigen Auffassungen zu den gleichen Konsequenzen, denn auch die Überprüfung der Aussagen des zweiten Standpunkts macht die Durchführung sehr vieler Experimente an identisch präparierten Einzelsystemen notwendig.

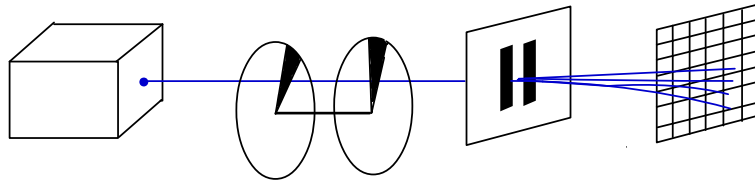


Abbildung 2: Versuchsanordnung zur Verdeutlichung von „Präparation“ und „Messung“.

Ensemble, Präparation, Messung und Zustand

In der Statistischen Interpretation wird der Unterschied zwischen den Begriffen „Präparation“ und „Messung“ besonders betont (obwohl diese Unterscheidung auch für die anderen Deutungen nützlich ist). Worum es sich dabei handelt, ist eigentlich recht einleuchtend. Da aber vor allem der Begriff der Messung in der Literatur in recht verwirrender Bedeutungsvielfalt gebraucht wird, soll anhand eines hypothetischen Experiments eine Illustration gegeben werden. Betrachten wir den in Abb. 2 gezeigten Versuchsaufbau: Aus einem Ofen kommt ein Strahl von Atomen, der einen Geschwindigkeitsselektor (z. B. eine Chopperanordnung) durchquert, damit alle Atome eine einheitliche kinetische Energie besitzen. Der Atomstrahl trifft auf einen Doppelspalt und wird von ihm gebeugt. Schließlich werden die Atome von einer Detektoranordnung registriert, von der wir annehmen, daß sie den Auftreffpunkt eines Atoms mit hinreichender Genauigkeit feststellen kann.

Der Zweck dieser Anordnung ist offensichtlich, einen Vergleich mit dem quantenmechanisch berechneten Doppelspalt-Interferenzmuster herbeizuführen. Zur theoretischen Beschreibung eines solchen Experimentes geht man von einer gegebenen Anfangswellenfunktion $\psi(\vec{x}, t = 0)$ aus, löst die Schrödingergleichung für die Doppelspaltanordnung und bestimmt den Endzustand $\psi(\vec{x}, t = T)$ zur Zeit T , dessen Betragsquadrat als Auftreffwahrscheinlichkeit für die Atome gedeutet wird.

Vergleichen wir das experimentelle Verfahren mit dem theoretischen Vorgehen wird klar, daß die Apparate vor dem Doppelspalt dazu dienen, den Anfangszustand $\psi(\vec{x}, t = 0)$ der Atome herzustellen. Man sagt, daß der Zustand *präpariert* wird. In unserem Beispiel liefert der Ofen eine breite Geschwindigkeitsverteilung, die durch den Selektor auf einen schmalen Bereich eingeschränkt wird (idealerweise auf *einen* bestimmten Wert). Der präparierte Anfangszustand besitzt dann (näherungsweise) eine feste longitudinale Geschwindigkeit (bzw. kinetische Energie).

Generell versteht man unter einem *Präparationsverfahren* eine experimentelle Anordnung, die es in reproduzierbarer Weise erlaubt, den gewünschten Anfangszustand eines quantenmechanischen Systems zu erzeugen. Eine saubere begriffliche Analyse des Präparationsgedankens wurde erst relativ spät in der Entwicklung der Quantenmechanik von Margenau [7], Lamb [8] und Ludwig [9] geliefert. Die beste Darstellung findet sich im Lehrbuch von Ballentine [11].

Einer der Grundzüge der Quantenmechanik ist, daß selbst eine vollständige Präparation das Ergebnis einer nachfolgenden Einzelmessung nicht festlegt, sondern nur die *Wahrscheinlichkeiten* bzw. die *Häufigkeitsverteilungen* der möglichen Ereignisse. In unserem Beispiel werden zwei Atome, die unter identischen Bedingungen präpariert worden sind, im allgemeinen an verschiedenen Stellen auf dem Detektorschirm auftreffen. Die Häufigkeitsverteilung ist durch $|\psi(\vec{x}, t = T)|^2$ gegeben.

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

den gleichen Zustand), wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für alle möglichen Messungen übereinstimmen.

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

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

Durch die Überlegungen dieses Abschnittes sollte schließlich einer der Hauptunterschiede zur Kopenhagener Deutung erkennbar geworden sein: Weil das Präparationsverfahren den Zustand des Systems bestimmt, bezieht sich in der Statistischen Interpretation der Zustand (die Wellenfunktion) nicht auf ein Einzelsystem, sondern immer auf ein Ensemble von identisch präparierten Objekten.

Formulierung der Statistischen Interpretation

Nach dieser begrifflichen Präzisierung der grundlegenden Konzepte können wir die Grundgedanken der Statistischen Interpretation klar formulieren:

1. *Die Quantenmechanik macht keine Vorhersagen über das Ergebnis eines einzelnen Experimentes* (außer in den trivialen Fällen in denen für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses 0 oder 1 berechnet wird).
2. *Die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantenmechanik beziehen sich auf wiederholte Messungen, die an einem Ensemble von identisch präparierten Systemen durchgeführt werden.* Hierdurch wird der oben unter 1. angeführte Standpunkt Einsteins präzisiert, wo er noch etwas unklar von einer „Elektronenwolke“ spricht, also eher von einem Vielteilchensystem statt einem Statistischem Ensemble. Wie wir noch sehen werden, berichtigte er dies später.
3. *Der empirische Gehalt einer Wahrscheinlichkeitsaussage wird überprüft, indem man ein Experiment viele Male wiederholt und die relativen Häufigkeiten der einzelnen Ereignisse ermittelt.* Diese Bestimmung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs klingt eigentlich selbstverständlich und entspricht der Vorgehensweise der Experimentalphysik. Es ist jedoch

nötig, diesen Punkt zu betonen, weil die Anhänger der Kopenhagener Deutung oft einen anderen Wahrscheinlichkeitsbegriff verwenden.

Die Auffassungen von Einstein und Born

Erhellende Diskussionen über die Prinzipien der Statistischen Interpretation findet man im Briefwechsel zwischen Einstein und Born sowie in einigen ihrer Arbeiten. Entgegen einem verbreiteten Vorurteil (das auch von Heisenberg genährt wurde), drückte Einstein nicht einfach nur seine Unzufriedenheit mit der Quantentheorie aus, ohne konstruktive Gegenvorschläge beizutragen. Seine eigene Position stellt er in den Bemerkungen zu den Arbeiten zusammen, die in dem von P. A. Schilpp herausgegebenen Band „Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher“ [12] versammelt wurden.

Um seinen Standpunkt zu erklären, betrachtet er zunächst das Beispiel eines zerfallenden Atoms mit einer Registriervorrichtung. Anhand dieses Systems erläutert er noch einmal die Probleme, die sich bei der Beschreibung einer Messung ergeben, wenn man die Quantenmechanik als eine Theorie der Einzelprozesse auffaßt (vgl. die Diskussion oben). Er faßt die Ergebnisse seiner Überlegungen dann folgendermaßen zusammen: „Diese Diskussion sollte nur folgendes zeigen: Man kommt zu sehr unplausiblen theoretischen Auffassungen, wenn man die These aufrechtzuhalten versucht, die statistische Quantentheorie leiste im Prinzip die vollständige Beschreibung eines individuellen physikalischen Systems. Dagegen verschwinden jene Schwierigkeiten der theoretischen Auffassung, wenn man die quantenmechanische Beschreibung als die Beschreibung von Systemgesamtheiten betrachtet. Zu diesem Ergebnis gelangte ich auf Grund recht verschiedenartiger Überlegungen. Ich bin davon überzeugt, daß jeder, der sich nur die Mühe nimmt, solche Überlegungen gewissenhaft durchzuführen, sich schließlich zu dieser Interpretation der quantentheoretischen Beschreibung gedrängt sieht (die ψ -Funktion ist als Beschreibung nicht eines Einzelsystems, sondern einer Systemgesamtheit aufzufassen).

Roh ausgesprochen lautet dieses Ergebnis: Im Rahmen der statistischen Quantentheorie gibt es keine vollständige Beschreibung des Einzelsystems. Vorsichtiger kann man es so sagen: Der Versuch, die quantentheoretische Beschreibung als vollständige Beschreibung der individuellen Systeme aufzufassen, führt zu unnatürlichen theoretischen Interpretationen, die sofort unnötig werden, wenn man die Auffassung akzeptiert, daß die Beschreibung sich auf Systemgesamtheiten und nicht auf Einzelsysteme bezieht“ [12].

In der Festschrift zu Max Borns Emeritierung schreibt er: „Das Ergebnis unserer Betrachtung ist dieses. Die einzige bisherige annehmbare Interpretation der Schrödinger-Gleichung ist die von Born gegebene statistische Interpretation. Diese liefert jedoch keine Realbeschreibung für das Einzelsystem, sondern nur statistische Aussagen über System-Gesamtheiten“ [13].

Mit Einsteins Beitrag zu dieser Festschrift beginnt eine freundschaftliche, aber engagierte Diskussion mit Max Born über die Interpretation der Quantenmechanik. Sie ist in ihrem Briefwechsel [14] dokumentiert und betrifft die Vollständigkeit der Quantenmechanik und den Übergang zur klassischen Physik. In bezug auf die statistischen Aussagen der Quantenphysik ist Born aber der gleichen Meinung wie Einstein; und man muß ihn als einen Anhänger der Statistischen Deutung ansehen.

Born schreibt: „Einstein gibt zu, daß man die ‚probabilistische Quantentheorie als endgültig‘ auffassen kann, wenn man annimmt, daß die ψ -Funktion sich auf ein ‚Ensemble und nicht auf einen individuellen Fall bezieht‘. Das war auch immer meine Auffassung, wobei ich die häufige Wiederholung eines Versuchs als Realisierung des Ensembles ansehe. Das stimmt genau mit dem wirklichen Vorgehen der Experimentalphysiker überein, die im atomaren und subatomaren Bereich ihre Daten stets durch Häufung von gleichartigen Messungen gewinnen“ ([14], Nr. 106).

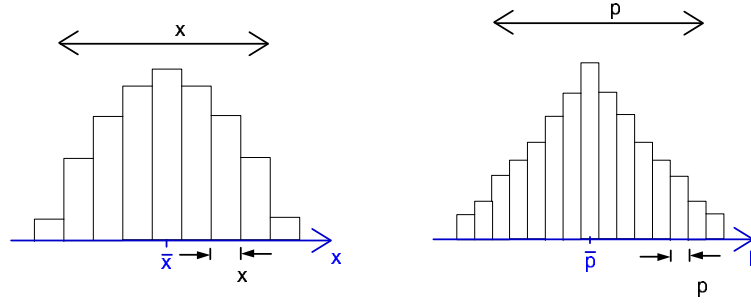


Abbildung 3: Meßfehler und Standardabweichungen für Ort und Impuls.

An anderer Stelle heißt es: „Die andere Bemerkung betrifft Deine [Einsteins] Deutung der ψ -Funktion: sie scheint mir genau mit dem übereinzustimmen, was ich mir von Anfang an dachte und was wohl alle vernünftigen Physiker heute denken. Daß ψ den ‚Zustand‘ eines Systems beschreibt, ist nur eine Redeweise wie im gewöhnlichen Leben: ‚Meine Lebenserwartung (als Mensch von 67 Jahren) ist 4,3 Jahre‘. Auch eine Aussage über ein einzelnes System, aber sinnlos im empirischen Sinne. Denn gemeint ist natürlich: Nimm eine Gesamtheit von Individuen, jedes 67 Jahre alt, und zähle, welcher Prozentsatz eine gegebene Zeit lebt. In dieser Weise habe ich die Deutung von $|\psi|^2$ immer aufgefaßt“ ([14], Nr. 96).

Die Statistische Interpretation und die Unbestimmtheitsrelation

Besonders deutlich wird der Unterschied zwischen Statistischer und Kopenhagener Deutung bei der Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2. \quad (1)$$

In der Kopenhagener Interpretation wird diese Ungleichung als Ausdruck der Tatsache angesehen, daß es prinzipiell nicht möglich ist, einem Quantensystem gleichzeitig einen Orts- und einen Impulswert zuzuschreiben. Dieser Zug der Quantenphysik wird durch den Begriff der Komplementarität beschrieben, nach dem die unter verschiedenen Versuchsumständen gewonnenen Erkenntnisse über ein Objekt nicht uneingeschränkt zu einem Gesamtbild kombiniert werden dürfen. Heisenberg hat diese Sichtweise, die für ihn auf die Unkontrollierbarkeit der Wechselwirkung zwischen Objekt und Meßgerät zurückgeht, mit zahlreichen Gedankenexperimenten illustriert.

Ganz anders sieht die Deutung der Unbestimmtheitsrelation in der Statistischen Interpretation aus [11, 15]. Hier werden die Größen Δx und Δp als Standardabweichungen in der statistischen Verteilung von Meßwerten angesehen (was auch durch die theoretischen Ausdrücke, die bei der Ableitung von (1) auftauchen, nahegelegt wird). Die operationale Bedeutung der Relation wird folgendermaßen gesehen: An einem statistischen Ensemble von gleich präparierten Systemen führt man die gleiche Messung (z. B. des Ortes) viele Male hintereinander aus. Die so gewonnenen Meßwerte wertet man statistisch aus (z. B. indem man wie in Abb. 3 ein Histogramm anfertigt und den Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung Δx berechnet). Das gleiche Verfahren wird an einem genauso präparierten Ensemble für die Messung des Impulses wiederholt. Aus der Verteilung der Meßwerte ergeben sich \bar{p} und Δp . Für das Produkt der beiden Standardabweichungen gilt die Ungleichung (1).

Um Mißverständnissen vorzubeugen, müssen einige Punkte betont werden:

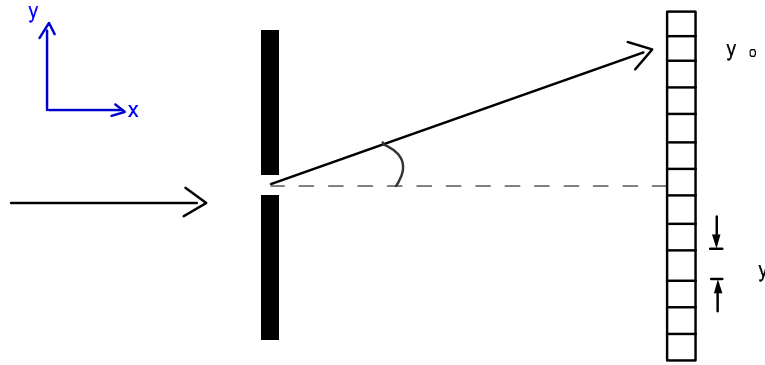


Abbildung 4: Gedankenexperiment zur Unbestimmtheitsrelation.

1. Die Größen Δx und Δp sind nicht als Ungenauigkeiten der Messung zu interpretieren. Um eine statistische Verteilung zu gewinnen, müssen die Meßfehler δx und δp der Einzelmessungen sehr viel kleiner als die Streuungen sein, wie in Abb. 3 illustriert.
2. Das hier geschilderte experimentelle Verfahren verlangt nicht die Messung von Ort und Impuls am gleichen Einzelsystem. Die Erklärung, wonach die Relation (1) auf die gegenseitige Störung gleichzeitiger Messungen zurückzuführen sei, ist nicht haltbar. Sie würde nahelegen, daß dem ungestörten Einzelsystem zu jedem Zeitpunkt eine Orts- und Impulseigenschaft zukommt, wie den Teilchen eines klassischen Gases.
3. Die Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf das Einzelsystem, sondern auf den Zustand, d. h. das in einer bestimmten Weise präparierte Ensemble.

Man kann die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelationen in der Statistischen Interpretation auch folgendermaßen formulieren: Es ist nicht möglich, eine Gesamtheit von Quantenobjekten in einen Zustand ψ so zu präparieren, daß $\Delta x \Delta p < \hbar/2$ für diese Gesamtheit erfüllt ist. Eine solche Deutung wurde zum ersten Mal von Popper in seinem (aus anderen Gründen berühmt gewordenen) Buch „Logik der Forschung“ [16] gegeben und später z. B. von Margenau [7] oder Ludwig [10] weiter entwickelt.

Ein weiteres Argument gegen die Gültigkeit der Heisenbergschen Ungleichung, wenn diese auf ein Einzelobjekt und nicht auf eine Gesamtheit bezogen wird, ist die Möglichkeit von retrodiktiven Messungen und Nulleffektmessungen [17]. Die einfachste Form einer retrodiktiven Messung ist die folgende (Abb. 4, [15]): Ein Strahl Elektronen mit dem Impuls p trifft auf eine Blende (p hat nur eine Komponente in x -Richtung). Der Ort y_0 eines Elektrons beim Auftreffen auf einen Schirm ist festgelegt bis auf den Fehler δy , der z. B. durch die Größe des Silberkomplexes auf der Fotoplatte entsteht. Die Impulskomponente in y -Richtung nach dem Durchgang durch den Spalt ist (nach üblicher Argumentation) $p_y = p \sin \alpha$. Wird der Abstand zwischen Blende und Schirm hinreichend groß gewählt, kann p_y mit sehr kleinem Fehler δp_y bestimmt werden. Dies kann ohne Änderung des Fehlers δy in der Ortsmessung passieren, so daß $\delta y \cdot \delta p_y < \hbar/2$ erreicht werden kann.

Heisenberg war sich dieses Widerspruchs zu seiner Unschärferelation bewußt: „Vorher sei jedoch bemerkt, daß die Unbestimmtheitsrelation sich offenbar nicht auf die Vergangenheit bezieht. Denn wenn zunächst die Elektronengeschwindigkeit bekannt ist, dann der Ort genau gemessen würde, so lassen sich auch für die Zeit vor der Ortsmessung die Elektronenorte genau ausrechnen; für diese Vergangenheit ist $\Delta q \Delta p$ dann kleiner als der übliche Grenzwert. Die Kenntnis der Vergangenheit hat jedoch rein spekulativen Charakter, denn sie geht (wegen der

Impulsänderung bei der Ortsmessung) keineswegs als Anfangsbedingung in irgendeine Rechnung über die Zukunft des Elektrons ein und tritt überhaupt in keinem physikalischen Experiment in Erscheinung. Ob man der genannten Rechnung über die Vergangenheit des Elektrons irgendeine physikalische Realität zuordnen soll, ist also eine reine Geschmacksfrage“ ([18], S. 15).

Experimente mit einzelnen Atomen

Wenn die Statistische Interpretation nur für ganze Ensembles von Quantenobjekten gilt, wie verhält es sich dann mit den Experimenten an einzelnen Atomen und Ionen, die man heute routinemäßig im Labor durchführen kann [19]? Können zu diesen Experimenten keine Aussagen gemacht werden? Dazu muß man bemerken, daß auch an einem Einzelobjekt statistische Aussagen gewonnen werden können, wenn man Präparation und Messung oft genug hintereinander wiederholt. So kann man etwa die mittlere Zeitdauer zwischen zwei Photonenemissionen an einem Ion in einer Falle messen. Solche statistischen Ergebnisse können dann mit den Vorhersagen der Theorie verglichen werden.

Die Tatsache, daß die wiederholte Durchführung einer Messung unter den gleichen Umständen am selben Quantenobjekt möglich ist, verdankt man dem Umstand, daß sie keine „Erinnerung“ besitzen: Für ein Atom in einem bestimmten Zustand ist seine Vorgeschichte unerheblich, etwa wie viele Anregungen innerhalb einer gewissen Zeitspanne es bereits hinter sich hat. Auf diese Weise kann ein Einzelobjekt immer von neuem präpariert werden und so ein Ensemble „simulieren“.

An diesem Beispiel kann man auch verdeutlichen, daß die Präparation nicht immer auf künstliche Eingriffe von Experimentatoren zurückgehen muß, sondern auch durch natürliche Prozesse erfolgen kann. Im einfachsten Fall reicht bloßes Warten aus: Wenn man ein Ensemble von Atomen im Grundzustand präparieren will, muß man sie nur vor äußeren Anregungen schützen und so lange warten, bis sie durch spontane Emission in den Grundzustand übergegangen sind [8].

Die Statistische Interpretation und verborgene Parameter

Es wurde schon mehrfach betont, daß die Statistische Interpretation keine Aussagen über Einzelsysteme macht. Sie verhält sich damit neutral gegenüber der Frage, ob es eine grundlegendere Theorie gibt, die auch das genaue Verhalten einzelner Objekte beschreibt. Weder benötigt sie eine solche, noch behauptet sie a priori, daß eine vollständigere Theorie unmöglich ist.

Gerade über diesen Punkt zog sich die oben erwähnte Debatte zwischen Born und Einstein lange hin, ohne daß es letztlich zu einer Einigung gekommen wäre. Für Einstein war die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit in grundlegender Weise unvollständig, wie er in der berühmten Einstein-Podolsky-Rosen-Arbeit [20] zu zeigen versuchte. Seine statistische Deutung der Quantenmechanik stand mit dieser Grundüberzeugung in Einklang. Er schreibt: „Ich bin [...] fest davon überzeugt, daß der grundsätzlich statistische Charakter der gegenwärtigen Quantentheorie einfach dem Umstande zuzuschreiben ist, daß diese mit einer unvollständigen Beschreibung der physikalischen Systeme operiert“ [12]. Weiter heißt es: „Wenn nämlich die statistische Quantentheorie das Einzelsystem (und seinen zeitlichen Ablauf) nicht vollständig zu beschreiben vorgibt, dann erscheint es unvermeidlich, anderweitig nach einer vollständigen Beschreibung des Einzelsystems zu suchen; dabei wäre es von vornherein klar, daß die Elemente einer solchen Beschreibung innerhalb des Begriffsschemas der statistischen Quantentheorie nicht enthalten wären. Damit würde man zugeben, daß dieses Schema im Prinzip nicht als Basis der theoretischen Physik dienen kann. Die statistische Quantentheorie würde – im Falle des Gelingens solcher Bemühungen – im Rahmen der zukünftigen Physik eine einigermaßen analoge Stellung einnehmen wie die statistische Mechanik im Rahmen der klassischen Mechanik“ [12].

Born hingegen war (wie Bohr, Heisenberg und die Anhänger der Kopenhagener Interpretation) der Ansicht, daß die Quantenmechanik keiner Vervollständigung durch eine umfassendere Theorie bedarf: „[Einstein] nennt meine Art der Beschreibung der physikalischen Welt ‚unvollständig‘; aber er hält dies für einen Mangel, auf dessen Beseitigung er hofft, während ich mich damit begnüge. Tatsächlich habe ich es immer als einen Fortschritt angesehen, weil eine exakte Beschreibung des Zustandes eines physikalischen Systems voraussetzt, daß man unendlich präzise Angaben darüber macht, was mir unsinnig scheint“ ([14], Nr. 97).

Fachdidaktische Überlegungen zur Statistischen Interpretation

In [2] wurde bereits angesprochen, daß der Physikunterricht insbesondere dann seine „pädagogische Dimension“ entfaltet, wenn eine wissenschaftstheoretische Reflexion über das, was Physik ist, erfolgt – natürlich auf schülerzugänglichem Niveau. Die grundlegende wissenschaftstheoretische Position der Statistischen Interpretation ist relativ leicht verständlich zu machen und kann sehr gut als Ausgangspunkt für eine Diskussion über Physik dienen.

Der Statistischen Interpretation liegt die Auffassung zugrunde, daß sich die Physik nur mit reproduzierbaren Ereignissen beschäftigt und darüber theoretische und experimentelle Aussagen gemacht werden. Im Bereich der Quantentheorie ist das Verhalten von Einzelsystemen in der Regel nicht reproduzierbar. Die Auftrefforte auf dem Schirm streuen stochastisch, die Impulsmeßwerte ebenfalls. Trifft ein auf Impuls präparierter Strahl von Elektronen auf einen Einfachspalt bestimmter Dimension, dann sind die *Häufigkeitsverteilungen* für Ort, Impuls und kinetische Energie reproduzierbar und durch die Zustandsfunktion bestimmt. Der Unterschied zu anderen Wissenschaften, wie z. B. der Archäologie, in denen es gerade um einmalige, nicht-reproduzierbare Ereignisse geht, kann im Zusammenhang mit der Grundposition der Statistischen Interpretation sehr gut besprochen werden. Ebenso kann eine Diskussion über verschiedenen Auffassungen zum Begriff der Wahrscheinlichkeit im Zusammenhang mit Anwendungen in der Physik fruchtbar sein (vgl. [21]).

Ein weiterer didaktischer Vorzug der Statistischen Interpretation besteht in der weitgehenden Übereinstimmung der Sprechweisen auf theoretischer und experimenteller Ebene. Zwischen allen Deutungen der Quantentheorie besteht Konsens darüber, daß die empirische Überprüfung der Voraussagen der Quantentheorie durch eine Gesamtheit identischer Experimente erfolgt, also relative Häufigkeiten ermittelt werden (in der Sprache der Gesamtheitsinterpretation: An der Gesamtheit identisch präparierter Systeme werden die Werte einer Observablen gemessen). Daß die Quantenmechanik das Verhalten von Gesamtheiten richtig beschreibt, ist also in beiden Deutungen unstrittig. Denn jede Theorie, die Wahrscheinlichkeitsaussagen macht, muß bei der Überprüfung die Wahrscheinlichkeitswerte der Theorie mit den relativen Häufigkeiten einer großen Zahl von identisch durchgeführten Experimenten vergleichen. Kontrovers sind die beiden Deutungen in der Beurteilung darüber, ob die Quantentheorie eine vollständige Beschreibung von Einzelereignissen liefert oder nur Aussagen über Ensembles macht. Die Vertreter letzterer Auffassung stützen sich dabei u. a. auf Überlegungen der Art, wie sie von Einstein stammen. Diese Haltung impliziert die Notwendigkeit der Konstruktion einer neuen Theorie, wenn auf der Beschreibung von Einzelereignissen bestanden wird.

Bei der Interpretation der Quantenphysik im Rahmen der Statistischen Deutung drängt sich bei den Schülerinnen und Schülern von selbst die weiterführende Frage auf, welche Aussagen über das Einzelsystem formuliert werden können, und dies führt zu Gesprächen über die heute verbreiteten und diskutierten Standpunkte zu dieser Frage (z. B. auch über die Bohmsche Fassung der Quantenmechanik, die in einem späteren Beitrag besprochen wird).

Weil die Statistische Interpretation auf Aussagen über Einzelereignisse verzichtet, kann sie einigen Problemen entgehen, mit denen andere Deutungen zu kämpfen haben. G. Ludwig [22]

kennzeichnet sie als eine von allen unnötigen „Luftschlössern“ befreite Interpretation der Quantenmechanik. In diesem Sinne kann sie als eine Minimalinterpretation angesehen werden, die eine Art „kleinsten Nenner“ darstellt.

Ein wichtiger Vorteil der Statistischen Deutung ist die klare, leicht verständliche und eindeutige Formulierung der Heisenbergschen Unschärferelation. Im Rahmen von Einzelsystembeschreibungen lassen sich nur die üblichen, recht unscharfen bzw. fragwürdigen Aussagen formulieren.

An verschiedenen Stellen (z. B. [23]) wurde dafür plädiert, mehrere Interpretationen mit ihrem philosophischen Hintergrund bei der Behandlung der Deutungsfragen der Quantenphysik zu thematisieren. Dabei besteht ein wichtiges Lernziel darin, den Schülerinnen und Schülern zu vermitteln, daß die Physik eine lebendige und damit auch kontroverse Wissenschaft ist. Der Unterschied zwischen den konsensfähigen Fakten der Quantenphänomene und den kontroversen Deutungen muß den Schülerinnen und Schülern vermittelt werden. Hierbei scheint es methodisch sinnvoll zu sein, sie zuerst mit der Statistischen Interpretation als Minimalinterpretation im hier dargestellten Sinne bekannt zu machen und diese dann den anderen Deutungen gegenüberzustellen. Kann das Maximalprogramm der Behandlung mehrerer Interpretationen nicht durchgeführt werden, muß die Beschränkung auf eine Interpretation und vor allem die dann zu erfolgende Wahl gut begründet werden. Die vorstehenden Überlegungen sollten klargemacht haben, daß in diesem Falle sowohl aus fachphysikalischer aber auch vor allem aus didaktischen Gründen die Statistische Interpretation sehr gut geeignet ist.

Literatur

- [1] H. Wiesner, R. Müller, *Stabilität und Spektrum der Atome*, Physik in der Schule **34**, 48 (1996).
- [2] R. Müller, B. Schmincke, H. Wiesner, *Atomphysik und Philosophie – Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik*, Physik in der Schule **34**, 165 (1996).
- [3] N. Bohr, *Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik*, in: [4].
- [4] P. A. Schilpp (Hrsg), *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Stuttgart 1955; gekürzte Fassung Braunschweig 1983.
- [5] L. E. Ballentine, *Einstein's Interpretation of Quantum Mechanics*, Am. J. Phys. **40**, 1763 (1972).
- [6] *Electrons et Photons*, Institut International du Physique Solvay, Rapports et Discussions du Cinquième Conseil de Physique, Paris 1928, S. 253.
- [7] H. Margenau, *Measurements in quantum mechanics*, Ann. Phys. (N. Y.), **23**, 469 (1963).
- [8] W. E. Lamb, *An operational interpretation of nonrelativistic quantum mechanics*, Physics Today 4/1969, S. 23.
- [9] G. Ludwig, *Zur Deutung der Beobachtung in der Quantenmechanik*, Phys. Bl. **11**, 489 (1955).
- [10] G. Ludwig, *Einführung in die Grundlagen der Theoretischen Physik, Bd. 3 – Quantentheorie*, Braunschweig 1976
- [11] L. E. Ballentine, *Quantum mechanics*, Englewood Cliffs 1990.

- [12] A. Einstein, *Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten*, in: [4].
- [13] A. Einstein, *Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quantenmechanik*, in: *Scientific papers presented to Max Born*, London 1953.
- [14] A. Einstein, M. Born, *Briefwechsel 1916–1955*, München 1969
- [15] L. E. Ballentine, *The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics*, Rev. Mod. Phys. **42**, 358 (1970).
- [16] K. R. Popper, *Logik der Forschung*, Tübingen 1934.
- [17] M. Renninger, *Messungen ohne Störungen des Meßobjektes*, Z. Phys. **158**, 417 (1960).
- [18] W. Heisenberg, *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*, Mannheim 1958; 1. Auflage 1930.
- [19] H. Walther, *Einzelne Atome, Photonen und Schrödingers Katze*, in: J. Audretsch, K. Mainzer (Hrsg.), *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?*, Mannheim 1990.
- [20] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- [21] P. Suppes (Hrsg.), *Logic and Probability in Quantum Mechanics*, Dordrecht 1976.
- [22] G. Ludwig, *Die Katze ist tot*, in: J. Audretsch, K. Mainzer (Hrsg.), *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?*, Mannheim 1990.
- [23] W. Jung, H. Wiesner, *Kontroverse Deutungen der Quantenphysik als Gegenstand des Physikunterrichts*, PdN-Ph. **33**, 276 (1984).