

Max Born

Die Interpretation der Quantenmechanik *)

Die folgenden Ausführungen sind eine Erwiderung auf den von *Erwin Schrödinger* im August und November 1952 in "The British Journal for the Philosophy of Science" veröffentlichten Artikel "Gibt es Quantensprünge? (Teil I und II)". Eine Diskussion über dieses Thema war für die am 8. Dezember 1952 stattfindende Versammlung der *Philosophy of Science Group* in Aussicht genommen, und ich war aufgefordert worden, die Aussprache zu eröffnen. Ich hatte diese ehrenvolle Einladung nicht ohne Bedenken angenommen, denn ich finde es peinlich, eine Meinungsverschiedenheit in einer so fundamentalen Frage mit einem meiner besten und ältesten Freunde öffentlich auszutragen. Zur Annahme bewogen mich schließlich verschiedene Gründe: Erstens bin ich der Überzeugung, dass keine Meinungsverschiedenheit in physikalischen Dingen unsere Freundschaft erschüttern könnte. Zweitens wusste ich, dass andere gute und alte Freunde von gleichem wissenschaftlichen Range wie *Schrödinger* meine Ansicht teilen, z. B. *Niels Bohr*, *Heisenberg* und *Pauli*. Der dritte und wichtigste Grund, die Diskussion der *Schrödingerschen* Publikation anzunehmen, war der, dass ihr unleugbarer literarischer Wert, die Weite des historischen und philosophischen Gesichtskreises und die geistreiche Darstellung einen verwirrenden Einfluss auf diejenigen Leser ausüben könnte, die, ohne selber Physiker zu sein, sich für die allgemeinen Gedankengänge der Physik interessieren.

Die Diskussion am 8. Dezember kam nicht zustande, da *Schrödinger* durch eine schwere Krankheit am Erscheinen verhindert war. Ich trug zwar meine vorbereitete Einführung vor und beantwortete Fragen, aber es ist klar, dass dadurch kein Austrag des Meinungsstreites erreicht wurde. So will ich denn hier meine Auffassung gedruckt vorlegen. Das Folgende ist eine etwas erweiterte Darstellung meiner Einleitungsrede. Demgemäß kommen keineswegs alle von *Schrödinger* angeführten Punkte zur Sprache, sondern nur solche, die mir für eine Diskussion unter Philosophen geeignet erscheinen.

*) Übersetzung aus "The British Journal for the Philosophy of Science", Bd. IV, 1953.

I Kurze Formulierung von Schrödingers Auffassung

Die Meinungsverschiedenheit zwischen *Schrödinger* und mir betrifft nicht so sehr eine Frage der eigentlichen Physik, als vielmehr die Beziehung der Physik zur Philosophie und menschlichen Erkenntnis im Allgemeinen. Jeder von uns theoretischen Physikern, *Schrödinger* natürlich eingeschlossen, würde ein konkretes physikalisches Problem mit den gleichen oder mindestens äquivalenten mathematischen Methoden angreifen und, wenn diese zum Ziele führen, würde die theoretische Voraussage und die Vorschrift für ihre experimentelle Bestätigung praktisch immer die gleiche sein. Die Meinungsverschiedenheit tritt erst in Erscheinung, wenn ein Philosoph kommt und fragt: "Was bedeuten deine Worte eigentlich? Wie bringst du es fertig, von Elektronen manchmal als Partikeln, manchmal aber als Wellen zu sprechen?", und dergleichen mehr. Solche Fragen nach dem wirklichen Sinn unserer Worte sind ebenso wichtig wie der mathematische Formalismus. Dieser Art sind *Schrödingers* Einwände. Er bekämpft den üblichen Sprachgebrauch in der Interpretation des quantenmechanischen Formalismus und schlägt eine andere, einfache,

puristische Sprache vor, die seiner Meinung nach der Lage besser entspricht. Meine Antwort lautet, dass seine puristische Ausdrucksweise nicht nur wegen ihrer Schwerfälligkeit unbrauchbar ist, sondern auch von historischen, psychologischen, epistemologischen und philosophischen Gesichtspunkten aus nicht gerechtfertigt werden kann.

Schrödingers Behauptungen lassen sich in einige wenige Sätze zusammenfassen: Die einzige Realität in der physikalischen Welt sind Wellen. Es gibt keine Partikel und keine Energiequanten hf. Diese sind Illusionen, die auf falscher Deutung der Resonanzerscheinungen bei Interferenz der Wellen beruhen. Die Wellen sind mit gewissen ganzen Zahlen auf eine Weise verknüpft, die von den Schwingungen einer Saite und anderer Musikinstrumente her wohl bekannt ist. Die Art, wie diese ganzen Zahlen auftreten, hat die Physiker zu der Annahme verführt, dass sie die Anzahl von Partikeln darstellen. Es gibt ferner ein für die Quantenmechanik charakteristisches spezielles Resonanzgesetz, nach dem die Summe der Eigenfrequenzen zweier aufeinander einwirkender Systeme konstant ist, und dieses Gesetz ist von den Physikern als der auf Quanten und Partikeln bezogene Erhaltungssatz der Energie gedeutet worden. Quanten oder Partikel gibt es aber gar nicht. Jeder Versuch, die physikalischen Erscheinungen unter Benutzung der Partikelvorstellung zu beschreiben, ohne mit der sicher festgestellten, für Wellen charakteristischen Art der Ausbreitung im Raume in Widerspruch zu geraten, führt zu unmöglichen, absurden Vorstellungen, wie die Annahme von zeitlosen Quantensprüngen der Partikel von einem stationären Zustand in den anderen. Und weiter: Versucht man ein Gas als ein System von Partikeln zu beschreiben, so ist man gezwungen, diese ihrer individuellen Unterscheidbarkeit zu berauben. Schreibt man das Symbol (A, B) als Ausdruck dafür, dass A sich an einer gewissen Stelle, B sich an einer anderen befindet, so sind die beiden Fälle (A, B) und (B, A) nicht nur physikalisch ununterscheidbar, sondern sie bilden auch statistisch nur einen Fall und nicht zwei, wie man vernünftigerweise erwarten sollte. Alle diese Schwierigkeiten und noch viele andere dazu verschwinden, wenn man die Partikelvorstellung aufgibt und nur noch von Wellen spricht.

II. Gibt es Atome?

Es ist nur wenige Jahre her, dass *Schrödinger* eine Arbeit unter dem Titel „2500 Jahre Quantenmechanik“ veröffentlicht hat, in der er betont, dass *Plancks* Entdeckung des Quantenbegriffs die Krönung einer stetigen Entwicklung darstelle, die mit den griechischen Philosophen *Leukipp* und *Demokrit*, den Begründern der atomistischen Schule, begonnen habe. Zu der Zeit hielt *Schrödinger* offenbar den Gedanken, dass die Materie sich aus Atomen, d. h. kleinsten unteilbaren Partikeln, zusammensetze, für eine große Errungenschaft. Nun verwirft er die gleiche Vorstellung, weil ihre Weiterverfolgung ein Knarren im Räderwerk unserer Logik hervorruft.

Es ist diese antiatomistische Haltung *Schrödingers*, die mir der schwächste und tatsächlich unhaltbare Punkt in seinen Ausführungen gegen die übliche Auslegung der Quantenmechanik zu sein scheint. Alle übrigen angeführten Argumente sind mehr technischer Natur, dieses aber ist grundlegend. Beiden Teilen seines Artikels schickt *Schrödinger* einen Abschnitt über den "kulturellen Hintergrund" voraus, in dem er die theoretischen Physiker der Jetztzeit beschuldigt, das Gefühl für historische Kontinuität verloren zu haben und ihre eigenen Leistungen im Vergleich zu denen ihrer Vorläufer zu überschätzen. Er führt hierfür Beispiele an, die ich nicht verteidigen will; doch scheint mir, dass er selber ein noch schlimmeres Beispiel für die von ihm angeführten Fehler gibt.

Seit der Neubelebung der atomistischen Idee durch Daniel *Bernoulli* (1738) in der

kinetischen Gastheorie und durch *Dalton* (1808) in der Chemie hat diese Idee sich als so außerordentlich fruchtbar und wirksam erwiesen, dass mir *Schrödingers* Versuch, sie über den Haufen zu werfen, fast vermessen erscheint, jedenfalls als eine offensichtliche Verletzung der historischen Kontinuität.

III. Wellen an Stelle von Atomen

Solch eine Verletzung wäre gerechtfertigt, wenn *Schrödinger* eine bessere und wirksamere Idee substituieren könnte. Und dies ist auch genau, was er für sich in Anspruch nimmt, wenn er behauptet, dass jeder Tatbestand in Physik und Chemie mit Hilfe der Wellenvorstellung beschrieben werden könne. Der ungeschulte Leser wird das sicher so verstehen, dass es sich um gewöhnliche Wellen in einem gewöhnlichen dreidimensionalen Raume handle. Erst im letzten Abschnitt des zweiten Teiles (5.241) sagt *Schrödinger*, dass man es meistens mit Wellen in einem vieldimensionalen Raume zu tun habe, aber "dass es wenig Wert habe, dies in einer allgemeinen Betrachtung weiter auszuführen". Meiner Ansicht nach jedoch ist dies ein wesentlicher Punkt, der diskutiert werden muss. Bevor ich dies tue, möchte ich jedoch betonen, dass ich *Schrödingers* Wellenmechanik für eine der bewundernswertesten Leistungen in der Geschichte der theoretischen Physik halte. Ich weiß auch, dass *Schrödinger* getrieben wurde durch seine Abneigung gegen die *Bohrsche* Theorie der stationären Zustände und Quantensprünge, die er durch etwas Vernünftigeres ersetzen wollte. Auch kann ich sehr wohl seinen Triumph nachfühlen, als es ihm gelang, diese abscheulichen stationären Zustände als harmlose Eigenschwingungen zu interpretieren und die geheimnisvollen Quantenzahlen als Analoga zu den Ordnungszahlen der musikalischen Obertöne. Ich begreife, dass man dieser schönen Idee verfallen kann.

Ich meinerseits habe keine persönliche Vorliebe für Wellen. Ich habe zusammen mit *Heisenberg* und *Jordan* eine andere Methode, die Matrizenmechanik, entwickelt, in der stationären Zuständen und Quantensprüngen ihre natürliche Stelle zukommt. Ich habe aber auch keine besondere Vorliebe für den Matrizengedanken. Sobald *Schrödingers* Wellengleichung publiziert wurde, wandte ich sie auf die Theorie der Zusammenstöße an und erhielt dadurch die Anregung, die Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsamplitude zu deuten¹⁾. Ich begrüßte *Schrödingers* eleganten Beweis der formalen Äquivalenz von Wellen- und Matrizenmechanik. Doch will ich weder zugunsten der Matrizenmechanik oder ihrer Verallgemeinerung durch *Dirac* sprechen, noch die Wellenmechanik angreifen. Ich will nur den übertriebenen Anspruch *Schrödingers* zurückweisen, aus dem der nicht geschulte Leser den Eindruck erhalten muss, dass alle Erscheinungen sich als gewöhnliche Wellen in einem gewöhnlichen Raum beschreiben lassen.

Der Physiker weiß, dass dies nicht zutrifft. Im Falle eines Zwei-Körper-Problems (wie beim Wasserstoffatom) lässt sich die Wellengleichung in

1) Tatsächlich ist die gewöhnlich Wellenfunktion genannte Größe schon in der Arbeit von *Heisenberg*, *Jordan* und mir (Z. f. Phys. 35, 1925, S.557) enthalten, allerdings nicht als Raumbfunktion ψ , sondern in einer unstetigen Darstellung X_n , mit deren Hilfe die Störungsrechnung in Kap. 3, § 2, S. 585 ff. behandelt wurde. Schon damals war mir die Deutung der Größen X_n als Wahrscheinlichkeiten durch den Kopf gegangen. Eine Begründung dieses Gedankens musste aber warten, bis *Schrödingers* Methode die Behandlung von Stoßprozessen möglich machte.

zwei auflösen, eine für die Bewegung des Massenzentrums und eine für die Relativbewegung, beide im dreidimensionalen Raum. Aber bereits im Falle des Drei-Körper-Problems (z. B. beim Heliumatom, das einen Kern und zwei Elektronen hat) ist dies unmöglich; man braucht einen Raum mit 6 Dimensionen für die Relativbewegung. Im Falle

von N Partikeln wird ein Raum von $3(N - 1)$ Dimensionen benötigt, und diese Anzahl kann nur in singulären Fällen reduziert werden.

Dies aber bedeutet, dass die Behauptung der Anschaulichkeit, d. h. der Möglichkeit, sich den Vorgang räumlich vorzustellen, hinfällig ist¹⁾. In Wirklichkeit ist eine vieldimensionale Wellenfunktion nichts als der Name für die abstrakte Größe ψ des mathematischen Formalismus, die bei einigen modernen theoretischen Physikern auch den gelehrter klingenden Namen "Zustandsvektor im Hilbertraum" führt. Jeder Versuch, irgendwelche Erscheinungen mit Ausnahme der allereinfachsten mit Hilfe dieser vieldimensionalen Wellenfunktionen in Worten zu beschreiben, ist nichts anderes als ein Versuch, den gedrängten Inhalt mathematischer Formeln in Worten unserer gewöhnlichen Sprache auszudrücken. Dies wäre aber nicht nur außerordentlich schwerfällig, sondern praktisch einfach unmöglich.

Auch macht *Schrödinger* tatsächlich gar keinen Versuch in dieser Richtung. Alle seine Beispiele sind so gewählt, dass eine Darstellung in nur drei Dimensionen möglich ist, indem er sich auf Fälle beschränkt, die sich (wir wollen uns' hier der Partikelvorstellung bedienen) auf voneinander unabhängige, d. h. nicht auf einander einwirkende Partikel beziehen, und dann zeigt er, dass sich diese Partikel nicht so verhalten, wie sich dies für gute, wohlerzogene Teilchen wie z. B. Sandkörner ziemt.

IV. Warum Atome unentbehrlich sind

Meiner Ansicht nach darf die Partikelvorstellung trotz dieser Absonderlichkeiten doch nicht aufgegeben werden. Wie ich bereits gesagt habe, ist die ganze Streitfrage für die Rechnereien des theoretischen Physikers ziemlich bedeutungslos. Sobald er aber seine Resultate mit experimentellen Tatsachen in Verbindung bringen will, muss er Angaben über physikalische Apparate machen. Diese aber bestehen aus festen Körpern und nicht aus Wellen. Also müsste auf jeden Fall, selbst wenn eine Beschreibung physikalischer Tatsachen unter ausschließlicher Benutzung der Wellenvorstellung

1) In einem andern kürzlich erschienenen Artikel (*Louis de Broglie*, Physicien et Penseur, ed. Albin Michel, Paris, 1952) bemerkt *Schrödinger*, dass die Dreidimensionalität der Wellen aufrecht erhalten werden könne mit Hilfe der Methode der "zweiten Quantelung" (5.24). Aber auch dann geht die Anschaulichkeit verloren, und der statistische Charakter der ψ -Funktion wird auf einem noch tieferen und abstrakteren Niveau eingeführt.

möglich wäre, doch von einem gewissen Punkte an der Übergang zu gewöhnlichen festen Körpern gemacht werden. Die Gesetze aber, die die Bewegung fester Körper regeln, sind ohne Zweifel die der Mechanik *Newtons*. Die Wellentheorie muss also notwendigerweise imstande sein, ihre Resultate in die Sprache der Mechanik gewöhnlicher Körper zu übersetzen. Geschieht dies systematisch, so ist die Matrizenmechanik oder eine ihrer Verallgemeinerungen das notwendige Bindeglied. Jedenfalls sehe ich nicht, wie dieser Übergang von der Wellenmechanik zur gewöhnlichen Mechanik fester Körper vermieden werden könnte.

Lassen Sie uns nun diesen Zusammenhang in umgekehrter Weise betrachten, indem wir von gewöhnlichen Körpern ausgehen. Man kann diese in kleinere und immer wieder kleinere Teile zerteilen. Gemäß den griechischen Atomisten gelangt man damit schließlich zu einem Ende, wenn nämlich die Teile Partikel werden, Atome, die nicht mehr unterteilbar sind.

Die moderne physikalische Theorie hat diese Auffassung in gewissem Grade modifiziert, doch brauche ich hier nicht auf Einzelheiten einzugehen, die jedermann bekannt sind. Die

Materieteilchen, die man durch eine solche fortgesetzte Unterteilung erhält, haben alle die gleichen physikalischen Eigenschaften wie die Ausgangssubstanz, bis man sich dem chemischen Atom nähert. Dieses ist zwar nicht unteilbar, aber seine Teile sind nun mehr qualitätsverschieden, Partikel einer subtileren Art, nämlich Systeme bestehend aus Kern und Elektronen. Wir entdecken, dass diese kleinsten Einheiten, die Atome und noch mehr die Kerne und Elektronen, nicht nur andere Eigenschaften, sondern ganz entschieden befremdliche Eigenschaften besitzen, Eigenschaften, die wir von unserer Erfahrung mit gewöhnlichen Körpern nicht gewohnt sind. Ihr Verhalten weicht durchaus von dem der Körnchen ab, in die wir anfangs unsere Substanz zermahlen haben. Sie haben keine eigene Individualität, ihre Lage und Geschwindigkeit kann auf Grund der *Heisenbergschen* Unschärfebeziehung nur mit beschränkter Genauigkeit bestimmt werden usw. Müssen wir nun sagen: Schön, so müssen wir auf den Teilchenbegriff verzichten und mit Bedauern den Gebrauch dieses nützlichen und bestechenden Bildes aufgeben?

Wir können dies tun, falls wir einen streng positivistischen Standpunkt einnehmen, nach dem Sinneseindrücke die einzige Realität sind und alles Übrige nur "Konstruktionen" unseres Verstandes. Mit Hilfe des mathematischen Apparates der Quantenmechanik können wir vorhersagen, was der experimentelle Physiker unter bestimmten Bedingungen beobachten wird, den Strom, den sein Galvanometer anzeigt, die Spur auf seiner photographischen Platte. Aber es ist sinnlos zu fragen, was hinter den Erscheinungen liegt, Wellen oder Partikel oder was sonst. Viele Physiker haben diesen Standpunkt angenommen. Mir persönlich widerstrebt er ganz und gar, und ebenso ergeht es *Schrödinger*; denn er besteht darauf, dass etwas Bestimmtes hinter den Erscheinungen, den Sinneseindrücken, liegt, das man als Wellenbewegung in einem noch ungenügend erforschten Medium beschreiben kann. Vor kurzem hat ein amerikanischer Physiker, *Bohm*, den entgegengesetzten Standpunkt eingenommen. Er behauptet, dass er die ganze Quantenmechanik auf Grund der gewöhnlichen Partikelvorstellung interpretieren könne, und zwar mit Hilfe von "verborgenen Parametern, die zur Beschreibung von unbeobachtbaren Prozessen dienen.

V. Wie sich die atomistische Auffassung modifizieren lässt

Meiner Ansicht nach lässt sich keiner dieser extremen Standpunkte aufrechterhalten, und ich halte die übliche Interpretation der Quantentheorie, die beide Beschreibungsweisen der beobachteten Erscheinungen, Wellen und Partikelvorstellung, miteinander in Einklang zu bringen sucht, für den richtigen Weg. Es ist unmöglich, hier in diesem Rahmen über die komplizierte logische Auswägung dieser Begriffe zu berichten; doch möchte ich mit Hilfe einiger Beispiele aus anderen Gebieten die Art und Weise beleuchten, wie die Partikelvorstellung der neuen Lage angepasst wird. Es ist natürlich keine neue Situation, dass ein Begriff in seiner ursprünglichen Bedeutung sich als zu eng gefasst erweist. Aber anstatt ihn aufzugeben, hat die Wissenschaft einen anderen Weg eingeschlagen, der ungleich fruchtbarer und befriedigender ist. Ein gutes Beispiel ist der Zahlbegriff. Unter einer Zahl verstand man ursprünglich nur ganze Zahlen, 1, 2, 3. . . *Kronecker* hat gesagt, die ganzen Zahlen habe Gott geschaffen, alles Übrige sei Menschenwerk. Und in der Tat, wenn man die Zahlen als ein Mittel zum Zählen definiert, so sind bereits die rationalen Zahlen, Brüche wie $\frac{2}{3}$ oder $\frac{4}{6}$ nicht mehr als Zahlen anzusehen. Schon die Griechen aber haben den Zahlbegriff auf rationale Zahlen ausgedehnt, wobei sie allerdings, nur eine endliche Menge von Brüchen ins Auge fassten, für die eine kleinste Einheit (kleinster gemeinsamer Nenner) gefunden werden kann. Dann aber machten sie die grundlegende

Entdeckung, dass die Diagonale des Quadrates mit der Seite 1, die wir heute Wurzel 2 schreiben, keine Zahl in diesem Sinne ist. So genial auch ihre Logik war, so taten sie jedoch nicht den nächsten konstruktiven Schritt: Sie hatten nicht die Kühnheit, den Zahlbegriff so zu erweitern, dass er auch Wurzel 2 mit umfassen konnte, sondern erfanden eine zwar geistreiche, aber doch ziemlich schwerfällige geometrische Methode zur Behandlung solcher Fälle. Das war der Stein des Anstoßes, durch den die Mathematik etwa 2000 Jahre aufgehalten wurde. Erst in moderner Zeit gelang es, die notwendige Verallgemeinerung des Zahlbegriffes vorzunehmen, um auch derartige Gebilde wie Wurzel 2 mit einzuschließen, die wir aber immer noch "irrational" nennen. Dann folgten weitere Verallgemeinerungen durch Einführung der algebraischen, transzendenten und komplexen Zahlen. Zwar kann man mit Hilfe dieser nicht zählen, doch haben sie andere, mehr formale Eigenschaften mit den ganzen Zahlen gemein, die nunmehr zu einem Spezialfall des erweiterten Zahlbegriffes werden. Ähnliche Verallgemeinerungen eines ursprünglich viel enger gefassten Begriffs sind in der Mathematik durchaus üblich; aber auch Physik kommen sie vor. Sicher verstand man unter Schall ursprünglich nur das, was man hören kann, und unter Licht das, was gesehen werden kann. Heute aber sprechen wir von unhörbarem Schall (Ultraschall) und von unsichtbarem Licht (Ultraviolett und Infrarot). Sogar im täglichen Leben ist dieser Prozess der Erweiterung des ursprünglichen Sinnes von Begriffen ständig im Gange. Nehmen wir z. B. den Begriff der Demokratie, der ursprünglich die Regierungsform von Stadtstaaten bedeutete, wo sich die Bürger auf dem Marktplatz versammelten, um ihre Probleme zu besprechen und zu entscheiden. Heute bezeichnet dieser Ausdruck die parlamentarische Regierungsform riesiger Staatsgebilde. In Rußland hat er sogar eine Bedeutung angenommen, die wir im Westen als das genaue Gegenteil von Demokratie ansehen. Aber lassen Sie uns lieber auf den sicheren Boden der Physik zurückkehren.

Ich bin der Meinung, dass ein erweiterter Gebrauch des Partikelbegriffs sich auf die gleiche Weise rechtfertigen lässt. Er muss nur zwei Bedingungen genügen: erstens muss die ursprüngliche Partikelvorstellung (etwas, das durch fortgesetzte Aufteilung grober Materie entsteht und aus dem diese aufgebaut werden kann) ein Spezialfall oder besser Grenzfall des neuen Begriffs sein, und zweitens muss der neue Begriff einige wichtige (wenn auch keineswegs alle) Eigenschaften dieser elementaren Vorstellung beibehalten.

In genau dieser Weise wird nun der Partikelbegriff in der Quantenmechanik gebraucht. Ich kann nicht sehen, was man dagegen einwenden kann. *Schrödingers* Einwände scheinen, mir sehr ähnlich den Hemmungen, welche die griechischen Mathematiker davon abhielten, die Diagonale des Einheitsquadrates als "Zahl" zuzulassen, nachdem sie sich überzeugt hatten, dass sie nicht als Quotient zweier ganzer Zahlen darstellbar ist. Würde *Schrödingers* These allgemein angenommen, so hätte das wohl nicht so schwerwiegende Folgen wie im Falle der Irrationalzahlen, denn sie richtet sich nicht gegen den theoretischen Formalismus, sondern nur gegen dessen philosophische Unterlagen. *Schrödinger* würde sogar zulassen, dass die Physiker und Chemiker auch weiterhin die Partikelsprache benutzen, jedoch mit dem gehörigen "als ob". Man stelle sich nur ein auf diese Weise geschriebenes Lehrbuch der Chemie vor: Wasser verhält sich, als ob es aus H_2O -Molekülen bestände, von denen jedes sich wieder so verhält, als ob es aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom zusammengesetzt sei. Gehen wir aber noch einen Schritt weiter und sagen, dass jedes Wasserstoffatom Eigenschaften aufweise, als ob es aus einem Kern und einem Elektron bestände, so gehen wir bereits über das von *Schrödinger* zugestandene Gebiet des "als ob" hinaus; denn hier besteht *Schrödinger* darauf, dass es kein Elektron genanntes Teilchen gibt, sondern nur eine Ladungswelle um den Kern, der selber ebenfalls irgendeine Welle ist. Aber wenn wir dann die Photoionisation eines solchen Wasserstoffatoms behandeln wollen, so müssen wir wieder auf unser "als ob" zurückgreifen, um die diskontinuierliche Erregung eines Geigerzählers zu beschreiben.

Im Leben wie in der Wissenschaft beruht das Wachstum der Sprache auf derartigen Verallgemeinerungen von Begriffen, die manchmal im Gange der Entwicklung zuerst mit einem "als ob" versehen, später aber assimiliert und zu anerkannten selbständigen Worten werden. Zu diesem Zwecke müssen die Regeln für ihre Anwendung auf vernünftige Weise festgesetzt werden. Auf dem Gebiete der Physik ist diese Entwicklung, bei der *Niels Bohr* eine führende Rolle gespielt hat, noch immer im Fortschreiten begriffen, und zwar meiner Ansicht nach mit gutem Erfolg. Selbstverständlich kann man noch bestimmte Punkte herausgreifen, bei denen sich eine gewisse logische Härte und Unausgeglichenheit zeigt, und das hat *Schrödinger* getan.

Andererseits aber kann auch *Schrödinger* den Gebrauch der Worte Partikel und Atome nicht vermeiden, und sie tauchen in vielen seiner Beispiele auf, da sonst seine Sätze keinen Sinn vermitteln würden. Wenn er z. B. über Quantenstatistik der Gase spricht, muss er eine Wellengleichung in einem vieldimensionalen Raum diskutieren. Vom Partikelstandpunkt aus hat diese Gleichung eine einfache Bedeutung, nämlich als Übersetzung des Erhaltungssatzes der kinetischen Energie von n Teilchen in wellenmechanische Ausdrucksweise. *Schrödinger* sieht sich jedoch gezwungen, diese Übertragung, das Wunderkind seines eigenen Geistes, zu verleugnen, denn sonst müsste er zugeben, dass es zumindest in einem gewissen Sinne Partikel gibt. Er muss die 3n-dimensionale Wellengleichung auf eine geniale Inspiration zurückführen, die dann experimentell bestätigt wurde. Dies aber ist eine Entstellung historischer Tatsachen.

VI. Zusammenstöße

Obgleich ich gern rein fachliche Einzelheiten vermeiden würde, muss ich hier noch einige Worte über das Problem der Zusammenstöße einschalten, das *Schrödinger* an mehreren Stellen erörtert (Abschnitt 6 und 8). Er hält das übliche quantenmechanische Vorgehen für fehlerhaft und beschuldigt die Physiker einer leichtfertigen Ausdrucksweise; er predigt, dass "die Physik kein Selbstgespräch" sei und prophezeit, dass die Arbeit der modernen Physiker nach 2000 Jahren vergessen sein werde, während das Werk von *Archimedes* und *Galilei* ähnliche Zeitspannen überdauert habe. In einem Brief an mich schreibt er: "Fast alle großen Erfolge der Quantenmechanik bestehen in der erfolgreichen Berechnung vollständiger Systeme von Eigenwerten (der Energie), jedesmal auf Grund einer bestimmten, mehr oder weniger plausiblen Annahme über die Natur des betrachteten Systems (seines Hamilton-Operators), und sie haben nichts zu tun mit der statistischen Deutung. Andererseits hat man die Experimente über Streuung (Berechnung von Differential-Querschnitten der Wechselwirkung und dergleichen). Der einzige Fall quantitativer Bestätigung ist, wie es scheint, die *Klein-Nishina-Formel*." (Diese beschreibt die Streuung von Licht oder von Photonen durch Elektronen). Ferner bezweifelt er, dass die statistische Deutung, die ich als erster vorgeschlagen hatte, und die dann durch *von Neumann* ganz allgemein formuliert worden ist, auf diese Fälle überhaupt anwendbar sei. Hierauf möchte ich erwidern, dass wir prinzipiell überhaupt nur aus Experimenten über Emission, Absorption und Streuung von Licht oder Elektronen Kenntnis über die Eigenwerte der Energie (Hamilton-Funktion) materieller Systeme haben. Alle diese Vorgänge sind auf die Kopplung des betrachteten Systems mit einem "Sondierungsfeld" (sei es ein elektromagnetisches oder Photonenfeld oder ein Feld der *de Broglieschen* Elektronenwellen) zurückzuführen, und es scheint mir ganz willkürlich, gerade den Streuungseffekt als weniger respektabel als die beiden anderen (Emission, Absorption) herauszugreifen. Darüber hinaus zeigt ein Blick auf die einschlägige Literatur, z. B. das bekannte Buch von *Matt* und *Massey* oder die wichtigen Arbeiten von *Niels Bohr* über den Durchgang von Partikeln durch Materie, sowie viele andere Bücher und Aufsätze, dass die Zahl der mehr oder weniger quantitativen Bestätigungen der quantenstatistischen

Streuungsgesetze sehr groß ist und' dass es auch besonders überzeugende qualitative Bestätigungen dieser Gesetze gibt. Sogar in der Kernphysik, in der unsere Kenntnisse des Gesetzes der Wechselwirkung (*Hamilton-Funktion*) unsicher und spärlich sind, wurden die Prinzipien der Quantenstatistik mit großem Erfolg angewandt. Wie groß dieser Erfolg ist, davon gibt die Atombombe ein eindrucksvolles Zeugnis.

Was nun *Schrödingers* Skeptizismus gegenüber der Anwendbarkeit der allgemeinen Vorschrift für Quantenübergänge (Quantensprünge) auf den Fall von Zusammenstößen anbetrifft, so bin ich nicht imstande, seinen Argumenten zu folgen. Er beschreibt den Vorgang so, als sei ein Zusammenstoß immer ein Übergang zwischen zwei Zuständen verschiedener Energie. Tatsächlich ist aber der typische "elastische" Zusammenstoß ein Übergang zwischen Zuständen mit gleicher Energie, jedoch verschiedenen Impulsvektoren. Die Methode, nach der ich ursprünglich diesen Fall des elastischen Zusammenstoßes behandelt habe, vermeidet jede Bezugnahme auf die Zeit: Es wird eine stationär einfallende Welle, die einen Strahl von Teilchen darstellt, betrachtet, von der sich durch Wechselwirkung mit einem Atom eine Kugelwelle abspaltet, die die abprallenden, gestreuten Teilchen darstellt. Bei dieser Betrachtungsweise gibt es weder einen Anfangs- noch einen Endzustand, zwei Begriffe, die nach der Ansicht *Schrödingers* nicht scharf definiert sind. Doch tauchen diese Begriffe in der *Diracschen* Darstellung der Theorie der Zusammenstöße auf, in der er den Stoß als Spezialfall der allgemeinen Theorie zeitlicher Übergänge auffasst (wie sie zum erstenmal in meiner Arbeit über "adiabatische Invarianten" und in *Diracs* gleichzeitigen Publikationen formuliert und dann durch *7. von Neumann* vervollkommen wurde). *Dirac* hat jedoch gezeigt, dass seine Methode, bei der vom Zeitablauf Gebrauch gemacht wird, der "stationären" Methode mathematisch äquivalent ist. Die begrifflichen Schwierigkeiten, die *Schrödinger* beanstandet, sind daher nur eine Frage sorgfältiger Formulierung.

Ein anderer Einwand *Schrödingers* bezieht sich auf die Approximationsmethode, die ich in früheren Arbeiten eingeführt hatte, um die mathematisch sehr komplizierten Streuungsgleichungen zu lösen. Diese Methode führt in erster Annäherung zu vernünftigen, teilweise gut bestätigten Resultaten; es ist jedoch schwierig, zu höheren Annäherungen vorzudringen, und auch wenn dies gelingt, treten Fälle auf, die zu divergenten Integralen führen. Doch gibt es andere Methoden, die ganz andere Entwicklungen benutzen (z. B. Reihen nach Kugel- und Bessel-Funktionen) und zu mathematisch einwandfreien und mit den Experimenten gut übereinstimmenden Resultaten führen.

Ich kann nicht recht einsehen, dass diese rein mathematischen Einwände mit der Streitfrage "Partikel oder Wellen" und "Quantensprünge" etwas zu tun haben. Denn auch wenn wir uns auf den *Schrödingerschen* Standpunkt stellen, dass es keine Partikel, sondern nur Wellen gibt, würden doch die Berechnungen der Streuung die gleichen bleiben. Der einzige Unterschied wäre, dass wir von der Intensität der einfallenden und der gestreuten Welle (elektromagnetischen, Elektronen-, Protonenwelle oder was es auch sein mag) sprechen und diese Wellenintensität nicht als Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Partikeln deuten würden. Das eigentliche Problem, um das es *Schrödinger* geht, ist, ob diese Wahrscheinlichkeitsdeutung sinnvoll ist. Seine mathematischen Skrupel haben nichts damit zu tun. Um diese wesentliche Frage zu entscheiden, kann man z. B. die Experimente *Rutherfords* über die Streuung von α -Strahlen an Kernen betrachten. Durch eine Art von glücklichem mathematischen Zufall ergeben hier die klassischen Berechnungen (welche mit Partikeln operieren, die den Gesetzen der Newtonschen Mechanik gehorchen) und die wellenmechanischen Berechnungen (die sich in diesem Falle streng durchführen lassen) das gleiche Resultat. Diese *Rutherfordsche* Streuformel wird durch Zählen der α -Teilchen im einfallenden und im gestreuten Strahl (für verschiedene Streuungsrichtungen) bestätigt, und dieses Ergebnis ist völlig unabhängig von der Zählmethode, mag diese in der visuellen Zählung der

Szintillationen eines Zinksulfidschirmes bestehen oder in der Anwendung automatischer Apparate verschiedener Typen, z. B. Geigerzähler. Wie trägt *Schrödinger* dieser Tatsache Rechnung? Soweit ich sehen kann, hat er hierfür überhaupt keine Erklärung. Er scheint zu denken, dass es nicht eine Diskontinuität des Strahles ist, die abzählbare Ereignisse liefert, sondern dass diese durch irgendeine Eigenschaft der Zählvorrichtung hervorgebracht werden. Wie aber soll man es erklären, dass das Resultat von der Art des Zählers unabhängig ist, und zwar in solchem Grade, dass die Lichtblitze in den kleinen Kristallen des Zinksulfidschirmes und die Entladungen in gasgefüllte Röhren, die mit einem komplizierten Verstärkungsapparat verbunden sind, die gleiche (mittlere) Anzahl von Ereignissen registriert? Hier wird *Schrödinger* durch seine Abneigung gegen die Partikelidee zu einer fast mystischen Einstellung gedrängt; er beschränkt sich darauf, die Hoffnung auszudrücken, dass die Zukunft dieses Rätsels auf befriedigende Weise lösen werde.

VII. Schlusswort

Es konnte nicht meine Absicht sein, in diesem Rahmen die statistische Deutung der Quantenmechanik eingehend zu diskutieren. Das wäre keine einfache Aufgabe und verlangte neben der Kenntnis eines komplizierten mathematischen Formalismus auch eine bestimmte philosophische Haltung: die Bereitwilligkeit, überkommene Begriffe zu opfern und neue sich anzueignen, wie z. B. *Bohrs* Prinzip der Komplementarität. Ich bin weit davon entfernt zu behaupten, dass die heute geläufige Interpretation vollkommen und endgültig sei, und ich begrüße *Schrödingers* Angriff gegen die zufriedene Gleichgültigkeit, mit der viele Physiker die übliche Auslegung auf Grund ihrer praktischen Brauchbarkeit einfach hinnehmen und sich nicht weiter den Kopf darüber zerbrechen, ob sie auf festen Füßen steht. Trotzdem glaube ich nicht, dass *Schrödingers* Artikel einen positiven Beitrag zur Lösung der philosophischen Schwierigkeiten bedeutet. Es ist nicht leicht für mich, die philosophischen Ansichten eines Freundes zu kritisieren, den ich als großen Gelehrten und tiefen Denker aufrichtig bewundere. Ich will daher zur Verteidigung meiner eigenen Auffassung eine Methode wählen, die zu benutzen auch *Schrödinger* selber nicht zu stolz ist, nämlich die Berufung auf anerkannte Autoritäten, die meine Ansicht teilen. Zu meinen Zeugen wähle ich *W. Pauli*, der allgemein als der kritischste und logisch sowie mathematisch anspruchsvollste unter den Fachgenossen angesehen wird, die zur Entwicklung der Quantenmechanik beigetragen haben. Der folgende Abschnitt stammt aus einem Brief, den ich kürzlich von *Pauli* erhalten habe:

"Entgegen allen rückschrittlichen Bemühungen (*Schrödinger*, *Bohm* usw. und in gewissem Sinne auch *Einstein*) bin ich gewiss, dass der statistische Charakter der ψ -Funktion und damit der Naturgesetze - auf dem Sie von Anfang an gegen *Schrödingers* Widerstand bestanden haben - den Stil der Gesetze wenigstens für einige Jahrhunderte bestimmen wird. Es mag sein, dass man später, z. B. im Zusammenhang mit den Lebensvorgängen, etwas ganz Neues finden wird, aber von einem Weg zurück zu träumen, zurück zum klassischen Stil von *Newton-Maxwell* (und es sind nur Träume, denen sich diese Herren hingeben) scheint mir hoffnungslos, abwegig, schlechter Geschmack. Und, könnten wir hinzufügen, es ist nicht einmal ein schöner Traum."

Was *Pauli* hier den "Stil" eines Gedankengebäudes nennt, ist mit anderen Worten die philosophische Haltung einer Epoche, die ihre kulturellen Grundlagen bestimmt. Diese fundamentalen Fragen sind es, in denen *Schrödinger* und ich verschiedener Meinung sind, und darum sind die Aussichten auf Einigung gering.