

Atomphysik und Philosophie – Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik

Rainer Müller, Bernhard Schmincke und Hartmut Wiesner

Einleitung

Auch 70 Jahre nach Entdeckung der Quantenmechanik haben deren ungewöhnliche Aussagen noch immer nichts von ihrer Faszination für unser weitgehend von der klassischen Physik geprägtes Denken eingebüßt, wie eine umfangreiche Reihe von Büchern (z.B. [1, 2, 3, 4]) belegt, die für die interessierte Öffentlichkeit, für Laien und Nichtspezialisten geschrieben wurden. Ihre Verbindung mit philosophischen Überlegungen und die ernsthafte Auseinandersetzung mit biologischen und psychologischen Grenzbereichen stoßen ebenso auf großes Interesse wie unbekümmerte Spekulationen oder ihre Verwendung in der Esoterik (z. B. [5]). Dies alles wäre Anlaß genug für einen entsprechend ausgerichteten Unterricht über Quantenphysik. Es gibt ein weiteres wichtiges Argument, das dafür spricht, den allgemeinen Fragen und Konsequenzen der Quantentheorie auch im Physikunterricht mehr Raum zu geben [6]. Dieses Argument ergibt sich aus bildungstheoretischen Überlegungen zum unverzichtbaren Beitrag des Physikunterrichts zur Allgemeinbildung und läßt sich folgendermaßen zusammenfassen: Die „pädagogische Dimension der Physik“ kommt nur dann zum Tragen, wenn das Lernen von Physik ergänzt wird durch eine wissenschaftstheoretische Reflexion darüber, was Physik ist [7, 8], die zur Einsicht in den Aspektcharakter der Physik führt. Diese Einsicht in „Rechte und Grenzen“ [8] der Physik läßt sich besonders fundiert anhand der Fragestellungen gewinnen, die Grenzbereiche betreffen oder sich auf die Deutungsprobleme der Quantenmechanik beziehen.

Um so bedauerlicher ist deshalb die bei den neueren Lehrbüchern der Quantenmechanik zu beobachtende Tendenz, daß Interpretationsprobleme weitgehend in den Hintergrund gedrängt werden. Wenngleich dieser Trend in den Schulbüchern erfreulicherweise nicht nachvollzogen wird, sollten die Bemühungen um die Vermittlung dieser grundsätzlichen Fragen verstärkt werden.

Historisch sicherlich die wichtigste Deutung der Quantenmechanik ist die Kopenhagener Interpretation, die ab Mitte der zwanziger Jahre im Kreis um Niels Bohr entstand. Mit ihr lag erstmals eine abgeschlossene und in sich konsistente Interpretation des mathematischen Formalismus vor. Obwohl einige Physiker, wie etwa Einstein und Schrödinger ihr immer ablehnend gegenüberstanden und gerade Einstein in einer brillanten und freundschaftlichen, sich über viele Jahre erstreckenden Diskussion [9] mit Bohr immer neue Einwände gegen sie vorbrachte, konnte dieser doch immer seine Position zufriedenstellend verteidigen und fand zahlreiche Anhänger.

Neben der ideengeschichtlichen Wichtigkeit der Kopenhagener Interpretation spricht ein weiteres Argument für ihre Behandlung im Schulunterricht: Die von Bohr formulierte Version ist aus einer allgemeinen Analyse der physikalischen Erkenntnismöglichkeiten hervorgegangen. Im Unterricht kann – und muß – sie deshalb bei nachvollziehbarer Behandlung zur Beschäftigung mit den philosophischen Hintergründen der Physik führen. Die Diskussion erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Fragen, wie sie fast zwangsläufig beim Besprechen der Bohrschen Standpunkte auftreten, spricht erfahrungsgemäß die aufgeschlosseneren, reflektierenden Schüler an, deren Interessen und Fähigkeiten im Unterricht oft zu kurz kommen.

Auch heute noch werden in vielen (insbesondere auch populärwissenschaftlichen) Texten die Argumente Bohrs benutzt. Kaum einmal wird jedoch seine Auffassung vollständig und im Zu-

sammenhang wiedergegeben, was leicht zu Verkürzungen und Mißverständnissen führen kann. Aber selbst die Lektüre der Bohrschen Originalarbeiten führt oftmals nicht zur erhofften Klarheit, da Bohrs Terminologie vielen Begriffen eine eigene, eng umrissene Bedeutung verleiht und sein Schreibstil sehr dicht und zum Teil etwas verschlungen ist.

Aus diesen Gründen soll hier eine möglichst umfassende und doch durchsichtige Darstellung der Kopenhagener Interpretation in Bohrs Version gegeben werden, die bei einer Behandlung des Gegenstands im Unterricht hilfreich sein kann. Als Grundkonzepte seiner Auffassung kann man die folgenden Ideen betrachten:

- a) die Unverzichtbarkeit klassischer Begriffe,
- b) der Begriff der Komplementarität und
- c) die Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene.

In den nachfolgenden Abschnitten sollen diese Elemente ausführlich besprochen werden. Dabei geben wir viele Passagen aus den Schriften Bohrs wörtlich wieder, um die Prägnanz seiner Begriffsbildungen nicht zu zerstören und ein Gefühl für den Duktus des Originals zu vermitteln.

Unverzichtbarkeit der klassischen Begriffe

Nach Bohrs Auffassung wird die klassische Physik durch die neue Theorie der Quantenmechanik nicht einfach verdrängt. Im Gegenteil: Sie spielt eine unverzichtbare Rolle in seinem Interpretationsgebäude. Ausgangspunkt für seine Argumentation ist „Galileis Programm, wonach die Beschreibung physikalischer Phänomene auf meßbaren Größen beruhen muß“ [10]. Bohr gründet hierauf seine Analyse des physikalischen Beobachtungsvorgangs, der im Bereich der Quantentheorie große Bedeutung gewinnt. Er argumentiert, daß für alle Experimente makroskopische Meßgeräte erforderlich sind, damit die zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung erforderlichen Operationen in kontrollierter Weise vorgenommen werden können. Infolgedessen kann es adäquat in Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden. „Der entscheidende Punkt ist hier die Erkenntnis, daß die Beschreibung der Versuchsanordnung und die Registrierung von Beobachtungen in der mit der gewöhnlichen physikalischen Terminologie passend verfeinerten Umgangssprache zu erfolgen haben. Dies ist eine einfache logische Forderung, da mit dem Wort Experiment nur ein Verfahren gemeint sein kann, über das wir anderen mitteilen können, was wir getan und was wir gelernt haben“ [10]. Es beruht also „unsere Deutung des Erfahrungsmaterials wesentlich auf der Anwendung der klassischen Begriffe“ [11].

Insbesondere – und das ist die wichtige Einsicht – bleibt diese Argumentation ungeändert auch für Experimente, die im Quantenbereich durchgeführt werden. Nach Bohr beruht die Unverzichtbarkeit der klassischen Begriffe in der Deutung der Quantenmechanik auf der Einsicht, „daß, wie weit auch die Phänomene den Bereich klassischer physikalischer Erklärung überschreiten mögen, die Darstellung aller Erfahrung in klassischen Begriffen erfolgen muß“ [9], denn „schon die Forderung der Mittelbarkeit der Versuchsumstände und der Meßergebnisse bedeutet ja, daß wir nur im Rahmen der gewöhnlichen Begriffe von wohldefinierten Erfahrungen sprechen können“ [12].

Im Schulunterricht wird man an dieser Stelle leicht auf Widerspruch stoßen: Man mag ja zugeben, daß die eindeutige Verständigung über den Aufbau von Experimenten und über ihre Ergebnisse notwendig ist. Ist dazu aber die Sprache der klassischen Physik unbedingt notwendig; ist es ausgeschlossen, daß das gleiche nicht mit neuen Begriffen geleistet werden kann, die besser an die Erscheinungen der Quantenwelt angepaßt sind? Um Bohrs Standpunkt besser zu verstehen, muß man den Rahmen weiter fassen und die dahinterstehenden Überlegungen genauer analysieren.

Ihm kommt es nicht auf spezielle Formen der klassischen Physik an. Es geht ihm vielmehr um folgende strukturelle Merkmale, die zusammen nur im klassischen Bereich realisierbar sind:

- a) die *raumzeitliche Darstellung* von Naturvorgängen. Damit ist die Angabe des Ortes von Gegenständen zu bestimmten Zeiten gemeint.
- b) die *kausale Beschreibung* physikalischer Prozesse. Dabei kann man das Kausalitätsprinzip der klassischen Physik folgendermaßen formulieren: „Ist der Zustand eines abgeschlossenen Systems in einem Zeitpunkt gegeben, so ist der Zustand in jedem früheren oder späteren Zeitpunkt eindeutig bestimmt“ [13]. Für Bohr fällt die kausale Beschreibung mit der Anwendbarkeit der Erhaltungssätze von Impuls und Energie zusammen. Das wird plausibel, wenn man einen Stoß- oder Streuvorgang betrachtet, bei dem die Erhaltungsgesetze die Rekonstruktion des Anfangszustandes gestatten.

Diese beiden Theoriemerkmale sind die zentralen Elemente in Bohrs Analyse des Beobachtungsproblems. Weshalb hielt er sie auch für die Registrierung von Ereignissen im atomaren Bereich für unverzichtbar, obwohl sie nach seiner Auffassung nur in der klassischen Physik widerspruchsfrei vereinigt werden können? Eine seiner klarsten Formulierungen dazu ist: „Trotz der Verfeinerungen der Terminologie, die die Anhäufung experimenteller Ergebnisse und die Entwicklung theoretischer Auffassungen mit sich gebracht haben, beruht jede Beschreibung physikalischer Erfahrung letztlich auf der Umgangssprache, die unserer Orientierung in der Umwelt und der Aufspürung von Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung angepaßt ist“ [10].

Hier entsprechen die Formulierungen „Orientierung in der Umwelt“ und „Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung“ den beiden oben genannten Merkmalen. Deutlicher herausgearbeitet wurde der Gesichtspunkt durch v. Weizsäcker [13, 14] und Meyer-Abich [15]. Ersterer gibt folgende Begründung für die geforderte raumzeitliche und kausale Beschreibung: „Falls ein physikalisches System als Meßinstrument in Gebrauch genommen werden soll, muß es sowohl in Raum und Zeit unserer Anschauung als auch dem Prinzip der Kausalität gehorchend beschreibbar sein. Die erste Bedingung garantiert, daß wir es überhaupt beobachten können, und die zweite, daß wir verlässliche Schlüsse von seinen sichtbaren Eigenschaften ziehen können (wie die Position eines Zeigers auf einer Skala) auf die unsichtbaren oder schwer sichtbaren Eigenschaften des Objekts, das wir mit jenem beobachten“ [14]. Beide Eigenschaften sind demnach für die Durchführung von praktischen Messungen unerlässlich. Diese Einsicht bildet die Grundlage für Bohrs Festhalten an ihrer Notwendigkeit.

Fassen wir unsere bisherigen Überlegungen zusammen: Bohr führt zur Naturbeschreibung im Quantenbereich keine neue „Quantensprache“ ein. Vielmehr läßt die Quantenmechanik „jedem klassischen Begriff seine volle Bedeutung; sie gibt nur Vorschriften darüber, wann er angewandt werden darf“ [13]. Es handelt sich also um eine *Einschränkung der unbegrenzten Anwendbarkeit* der gewöhnlichen Begriffe. Bohr selbst drückt das folgendermaßen aus: „Charakteristisch für die Quantentheorie ist die Erkenntnis einer fundamentalen Begrenzung der klassischen physikalischen Begriffe“ [11]. Und wenn er von einer „Untersuchung der Bedingungen für den eindeutigen Gebrauch der klassischen Begriffe bei der Analyse atomarer Phänomene“ [10] spricht, so sind dabei die Anklänge an die Terminologie Kants bestimmt nicht zufällig.

Betrachten wir nun, wie die Forderung nach raumzeitlicher und kausaler (also klassischer) Beschreibung nach Bohrs Meinung in realen Messungen an Quantensystemen erfüllt ist. Er schreibt dazu: „Bei den vorkommenden Versuchsanordnungen ist die Erfüllung solcher Forderungen dadurch sichergestellt, daß als Meßgeräte starre Körper gebraucht werden, die so schwer sind, daß ihre relativen Lagen und Geschwindigkeiten eine völlig klassische Feststellung gestatten“ [10]. An anderer Stelle heißt es: „Bei den tatsächlich ausgeführten Versuchen ist diese

Forderung durch die Festlegung der Versuchsbedingungen mit Hilfe von schweren Körpern wie Blenden und fotografischen Platten, deren Gebrauch mit Begriffen aus der klassischen Physik beschrieben wird, weitgehend erfüllt“ [16]. Welche Art von Geräten Bohr dabei vorschwebte, wird sehr schön illustriert durch die Zeichnungen in dem Aufsatz über seine Diskussionen mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik [9].

Eng mit der Existenz von makroskopischen Körpern verbunden ist das Auftreten von *Dissipation*, die ein weiterer wesentlicher Bestandteil von Bohrs Konzept eines Beobachtungsvorgangs ist: „In diesem Zusammenhang ist es auch wesentlich, sich daran zu erinnern, daß jede eindeutige Erfahrung, die atomare Objekte betrifft, von permanenten Spuren stammt – wie z. B. einem durch das Auftreffen eines Elektrons auf eine fotografische Platte hervorgerufenen Fleck –, die auf den Körpern, welche die Versuchsbedingungen bestimmen, hinterlassen werden. Weit davon entfernt, eine besondere Schwierigkeit zu bedeuten, erinnern uns die irreversiblen Verstärkungseffekte, auf denen die Registrierung des Vorhandenseins atomarer Objekte beruht, vielmehr an die wesentliche, dem Beobachtungsbegriff selber inhärente Irreversibilität“ [10]. Dieser Aspekt ist auch eng mit dem Begriff des „Phänomens“ verknüpft, der weiter unten noch näher erläutert wird.

Komplementarität

Mit der Notwendigkeit, das Funktionieren der Meßgeräte rein klassisch zu beschreiben, stehen wir vor dem Problem, unter welchen Umständen es überhaupt zu Quantenphänomenen kommt, d. h. zu Erscheinungen, die sich nicht in der typischen klassischen Art (raumzeitlich und kausal) beschreiben lassen. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch das Plancksche Wirkungsquantum. Es behält nämlich, so Bohr, „die ganze Beschreibungsart der klassischen Physik mit Einschluß der Relativitätstheorie ihre Zweckmäßigkeit nur solange [bei], als alle in die Beschreibung eingehenden Wirkungen groß sind im Vergleich zum Planckschen Quantum. Wenn dies nicht der Fall ist, treten, wie im Bereich der Atomphysik, neuartige Gesetzmäßigkeiten auf, die im Rahmen einer Kausalbeschreibung nicht zusammengefaßt werden können. Dieses zunächst paradox erscheinende Ergebnis findet indessen seine Aufklärung darin, daß auf diesem Gebiete nicht länger scharf unterschieden werden kann zwischen dem selbständigen Verhalten eines physikalischen Objekts und seiner Wechselwirkung mit anderen als Meßinstrumenten dienenden Körpern, die mit der Beobachtung unvermeidlich verknüpft ist und deren direkte Berücksichtigung nach dem Wesen des Beobachtungsbegriffs selber ausgeschlossen ist“ [12].

Der wichtige Punkt dabei ist die Unkontrollierbarkeit der Wechselwirkung zwischen Objekt und Meßgerät. Daß es eine Rückwirkung des Meßgeräts auf das zu messende Objekt auch in der klassischen Physik geben muß ist klar. In der klassischen Physik wird diese Rückwirkung entweder als vernachlässigbar angesehen (z. B. der Einfluß des Strahlungsdrucks beim Durchlaufen einer Lichtschranke) oder es gibt eine Korrekturtheorie, die es erlaubt, die Wirkung des Meßgeräts zu berücksichtigen (ein häufig zitiertes Beispiel ist die Temperaturmessung mit einem Thermometer, dessen Einfluß berücksichtigt werden kann, wenn seine Wärmekapazität bekannt ist). Das ist in der Quantenphysik jedoch nicht möglich. Entsprechend schreibt Bohr: „Der Hauptunterschied zwischen der Untersuchung von Phänomenen in der klassischen Physik und in der Quantenphysik ist [...], daß in der ersteren die Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Meßgeräten außer acht gelassen oder kompensiert werden kann, während in der letzteren diese Wechselwirkung einen integrierenden Bestandteil der Phänomene bildet“ [17]. Nur als Nebenbemerkung sei gesagt, daß diese prinzipielle Unkontrollierbarkeit für Bohr der Ursprung des statistischen Charakters der Aussagen der Quantentheorie darstellt [10].

Erhebliche Konsequenzen hat die Untrennbarkeit von Objekt und Meßgerät, die es nicht erlaubt, beiden einen selbständigen physikalischen Zustand zuzuschreiben, auch für die raumzeit-

liche und kausale Beschreibung, die das Kennzeichen eines klassischen Phänomens ist. Berücksichtigt man sie in der Analyse des Beobachtungsvorgangs, findet man sich in folgender Situation: „Einerseits verlangt die [Bestimmtheit] eines Zustandes eines physikalischen Systems, wie gewöhnlich aufgefaßt, das Ausschließen aller äußeren Beeinflussungen; dann ist aber nach dem Quantenpostulat auch jede Möglichkeit der Beobachtung ausgeschlossen, und vor allem [verliert der Begriff der raumzeitlichen Beschreibung] seinen unmittelbaren Sinn. Lassen wir andererseits, um Beobachtungen zu ermöglichen, eventuelle Wechselwirkungen mit geeigneten, nicht zum System gehörigen, äußeren Messungsmitteln zu, so ist der Natur der Sache nach eine eindeutige Definition des Zustandes des Systems nicht mehr möglich, und es kann von Kausalität im gewöhnlichen Sinne keine Rede mehr sein. Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns also damit begnügen, die Raum-Zeit-Darstellung und die Forderung der Kausalität, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhalts der Erfahrung aufzufassen [...]“ [11]. Demzufolge haben wir also einerseits die Möglichkeit, eine raumzeitliche Beschreibung zu erlangen, indem wir eine Wechselwirkung mit dem Meßgerät zulassen. Dann müssen wir auf die kausale Beschreibung (mit Hilfe der Erhaltungssätze für Energie und Impuls) verzichten. Umgekehrt können wir das Objekt vom Meßgerät isolieren (so daß gar keine Messung stattfindet), und wir keinerlei Aufschluß über sein raumzeitliches Verhalten erhalten. Die beiden Grundaspekte der klassischen Beschreibungsweise können nicht zugleich im Bereich der Quantenphänomene verwirklicht werden, aber sehr wohl einzeln. Diesen Grundzug der Quantenmechanik bezeichnet Bohr als *Komplementarität*.

Das folgende, etwas konkretere Beispiel erläutert die Situation noch deutlicher: „Diese Sachlage [die Unmöglichkeit einer Analyse der Meßwechselwirkungen] verhindert die uneingeschränkte Verbindung von raumzeitlicher Koordinierung und dem Gesetze der Erhaltung von Impuls und Energie, auf dem die kausale bildliche Beschreibung der klassischen Physik beruht. So wird eine Versuchsanordnung, mit deren Hilfe bestimmt werden kann, wo sich ein atomares Teilchen, dessen Lage zu einem gegebenen Zeitpunkt bekannt ist, zu einem späteren Zeitpunkt befinden wird, eine prinzipiell unkontrollierbare Übertragung von Impuls und Energie auf die festen Maßstäbe und regulierten Uhren, die zur Definition des Bezugssystems notwendig ist, mit sich bringen. Umgekehrt wird der Gebrauch jeder Versuchsanordnung, die zum Studium der für die Beschreibung wesentlicher Eigenschaften atomarer Systeme entscheidenden Erhaltung von Impuls und Energie geeignet ist, einen Verzicht auf ins einzelne gehende raumzeitliche Koordinierung der Teilchen, aus denen die Systeme bestehen, mit sich führen.“ [16]

Eine Versuchsanordnung, bei der die raumzeitliche Beschreibung angewendet werden darf, besteht z. B. aus einer Blende, die starr mit einem massiven Körper verbunden ist, der als räumliches Bezugssystem dienen kann. Die (sehr kleine) Blendenöffnung kann dann den Ort festlegen (messen). Daß mit einer solchen Anordnung die Impulsänderung beim Durchgang durch die Blende nicht festgestellt werden kann, ist offensichtlich. Soll der Zeitpunkt des Durchgangs des Mikroobjektes durch die Blende mit einbezogen werden, kann dies z.B. durch einen Schieber, der mit einem Uhrwerk versehen ist, erreicht werden.

Bei einer Anordnung, mit der die Impulsänderung durch die Blende in Richtung der Blendenebene bestimmt werden kann, muß die starre Anordnung und damit der definierte Ort aufgegeben werden. So könnte etwa die Blende an „weichen“ Federn aufgehängt und mit Hilfe eines Testkörpers ihr Impuls vor und nach Objektdurchgang über Stoßversuche bestimmt werden; damit könnte die Impulsänderung des atomaren Objektes in der Ebene senkrecht zu seiner Einfallrichtung durch die Wechselwirkung mit der Blende gemessen werden. Gleichzeitig ginge aber die Möglichkeit der räumlichen Beschreibung verloren. Denn dazu müßte die Blende mit einem starren Körper in Wechselwirkung gebracht werden, was wieder mit einer nicht erfaßbaren Impulsänderung verbunden wäre.

Eine Synthese der beiden unvereinbaren Aspekte wird durch die Idee der Komplementarität geliefert, indem „das unter verschiedenen Versuchsbedingungen gewonnene Material nicht mit einem einzelnen Bilde erfaßt werden [kann]; es ist vielmehr als komplementär in dem Sinn zu betrachten, daß erst die Gesamtheit aller Phänomene die möglichen Aufschlüsse über die Objekte erschöpfend wiedergibt“ [9].

Eine sehr genaue Formulierung dieses Sachverhalts findet man bei Ph. Frank: „Wie Bohr [...] betont hat, spricht die Quantenmechanik weder von Teilchen, deren Lage und Geschwindigkeit vorhanden sind, aber nicht genau beobachtet werden können, noch von Teilchen mit unbestimmter Lage und Geschwindigkeit, sondern von Versuchsanordnungen, bei deren Beschreibung die Ausdrücke ‚Lage eines Teilchens‘ und ‚Geschwindigkeit eines Teilchens‘ nicht zugleich verwendet werden können. Wenn bei der Beschreibung einer Versuchsanordnung der Ausdruck ‚Lage des Teilchens‘ verwendet werden kann, so kann bei der Beschreibung derselben Anordnung der Ausdruck ‚Geschwindigkeit eines Teilchens‘ nicht verwendet werden und umgekehrt. Versuchsanordnungen, von denen eine mit Hilfe des Ausdrucks ‚Lage eines Teilchens‘ und die andere mit Hilfe des Ausdrucks ‚Geschwindigkeit‘ oder, genauer gesagt, ‚Impuls‘ beschrieben werden können, nennt man komplementäre Anordnungen und die Beschreibungen komplementäre Beschreibungen“ [18].

Der Begriff der Komplementarität darf als das zentrale Konzept in Bohrs Interpretation der Quantentheorie gelten. Er bewertete sie als ein allgemeines erkenntnistheoretisches Prinzip, dessen Geltung sich über die Physik hinaus erstreckt. Ihre Anwendungen sah er etwa in Biologie, Psychologie und Anthropologie, was sich in Aufsätzen mit Titeln wie „Licht und Leben“, „Die Physik und das Problem des Lebens“ oder „Erkenntnistheoretische Fragen in der Physik und die menschlichen Kulturen“ niederschlug. Deshalb ist es bei der Behandlung in der Schule verfehlt, die Komplementarität einfach auf den Welle-Teilchen-Dualismus oder die Unmöglichkeit der gleichzeitigen Messung von Ort und Impuls zu reduzieren, wie das in den meisten Darstellungen geschieht. Die vorangegangenen Ausführungen sollten den Standpunkt Bohrs deutlicher gemacht haben.

Auf eine weitere begriffliche Schwierigkeit muß sich der Lehrer vorbereiten, wenn die Bohrschen Gedankenversuche zur Komplementarität im Unterricht behandelt werden: Zwar muß das Meßinstrument klassisch beschrieben werden können, aber auf diejenigen Teile des Meßinstruments, die direkt mit dem atomaren Objekt wechselwirken und die ebenfalls klassisch beschreibbar sein müssen, ist ebenso wie auf die atomaren Objekte der quantenmechanische Formalismus anzuwenden: „Wir wollen hier nur beiläufig erwähnen, daß es zur Veranschaulichung der vorangehenden Betrachtungen nicht wesentlich ist, ob Experimente, die eine genaue Kontrolle der Übertragung von Impuls und Energie von atomaren Teilchen auf schwere Körper, wie Schirme, Blenden und Schieber, bezwecken, sehr schwierig, falls überhaupt ausführbar sind. Entscheidend ist nur, daß diese Körper – im Gegensatz zu den eigentlichen Meßgeräten – zugleich mit den Teilchen in einem solchen Falle das System bilden, auf das der quantenmechanische Formalismus Anwendung finden soll“ [9]. Recht treffend beurteilt Jammer Bohrs Lösung des Problems Mikrophysik - Makrophysik: „Diese Doppelnatur des makroskopischen Apparates (auf der einen Seite ein klassisches Objekt und auf der anderen ein quantenmechanisches) mit deren Hilfe Bohr [...] seine Position erfolgreich verteidigte, blieb ein irgendwie fragwürdiger oder zumindest dunkler Aspekt in Bohrs Konzeption der quantenmechanischen Messung“ [19].

Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene

Um die Bohrschen Gedankengänge ohne Mißverständnisse nachvollziehen zu können, muß man sich die Besonderheiten seiner Terminologie erst aneignen. Im gegenwärtigen Zusammenhang ist seine Auffassung des Begriffs *Quantenphänomen* von Interesse, dessen Bedeutung aus folgender

Passage hervorgeht: „Als zweckmäßigere Ausdrucksweise empfahl ich, das Wort Phänomen ausschließlich anzuwenden in Verbindung mit Beobachtungen, die unter genau angegebenen, den Bericht der ganzen Versuchsanordnung einschließenden Bedingungen gewonnen sind. Mit einer solchen Terminologie ist das Beobachtungsproblem von jeglicher Mehrdeutigkeit befreit; denn in den Experimenten handelt es sich ja immer um durch unzweideutige Feststellungen ausgedrückte Beobachtungen, wie z. B. die Registrierung des Punktes, an dem ein Elektron auf die photographische Platte auftrifft“ [9]. Mit dieser Formulierung spricht Bohr auch noch einmal die für seinen Phänomenbegriff entscheidende *Abgeschlossenheit* an, die sich, wie wir oben schon sahen, in *irreversiblen Verstärkungsprozessen* während des Beobachtungsvorgangs beruht.

Eine nützliche Ergänzung liefert das folgende Zitat von Pauli: „Bohr definiert Phänomen als ‚sich beziehend auf Beobachtungen, die unter spezifizierten Umständen, einschließlich einer Angabe des ganzen Experiments, erhalten sind‘. Diese Definition ermöglicht es, von einem neuen Phänomen zu sprechen, wenn ein Teil der Versuchsanordnung verändert wird, und die Begrenzung der Teilbarkeit von Phänomenen in der Naturbeschreibung mit in Rechnung zu stellen“ [20].

Damit ist ein weiterer wesentlicher Zug des Bohrschen Phänomenbegriffs zur Sprache gekommen, nämlich seine *Ganzheitlichkeit*, manchmal auch als „Individualität“ (im Sinne von Unteilbarkeit) oder „Nichtanalysierbarkeit“ bezeichnet. Ihre Ursache liegt wieder in der „Unmöglichkeit einer scharfen Trennung zwischen dem Verhalten atomarer Objekte und der Wechselwirkung mit den Meßgeräten, die zur Definition der Bedingungen dienen, unter welchen die Phänomene erscheinen. Tatsächlich findet die Individualität der typischen Quanteneffekte ihren logischen Ausdruck in dem Umstande, daß jeglicher Versuch einer Unterteilung eine Änderung in der Versuchsanordnung verlangt und somit neue, prinzipiell unkontrollierbare Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Meßgeräten herbeiführt“ [9]. Analysiert man ein quantenmechanisches Experiment, ist es, so Bohr, „außerordentlich wesentlich, daß die gesamte Versuchsanordnung miteinbezogen wird. Tatsächlich würde der Einbau jedes weiteren Apparateils, etwa eines Spiegels, in den Weg eines Teilchens neue Interferenzeffekte verursachen, die die Voraussagen über die schließlich zu registrierenden Ereignisse wesentlich beeinflussen“ [9]. Aus diesen Passagen wird auch deutlich, wie eng die Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene mit dem Begriff der Komplementarität verknüpft ist.

Ein instruktives Beispiel ist das Doppelspaltexperiment mit Elektronen. Versucht man durch Comptonstreuung hinter den beiden Spalten festzustellen, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist, verschwindet das Interferenzmuster auf dem Schirm, das Phänomen ist zerstört. In der klassischen Physik kann im Prinzip eine Versuchsanordnung sukzessive so verfeinert werden, daß der ablaufende Prozeß detaillierter verfolgt werden kann, ohne daß das Phänomen dadurch völlig verändert wird. Das Neue und Überraschende im Bereich der Quantenphysik ist nun gerade diese Ganzheitlichkeit der Phänomene, die bei einem Versuch der detaillierteren Untersuchung in einer gravierenden Änderung des Phänomens besteht.

Tatsächlich geht Bohr sogar so weit, zu sagen, „daß kein Ergebnis eines Experimentes über ein im Prinzip außerhalb des Bereiches der klassischen Physik liegenden Phänomen dahin gedeutet werden kann, daß es Aufschluß über unabhängige Eigenschaften der Objekte gibt; es ist vielmehr unlöslich mit einer bestimmten Situation verbunden, in deren Beschreibung auch die mit den Objekten in Wechselwirkung stehenden Meßgeräte als wesentliches Glied eingehen“ [21]. Die Nichtanalysierbarkeit der Wechselwirkung zwischen atomarem Objekt und Meßgerät führt ihn dazu, beide als eine physikalisch untrennbare Einheit anzusehen und dem atomaren Objekt keine selbständigen (d. h. von der Meßordnung unabhängigen), objektiven Eigenschaften zuzuschreiben.

Die Betonung des Ganzheitlichkeitsaspektes kennzeichnet die Bohrsche Spätphase in der Interpretation der Quantenmechanik. Diese setzt ein mit Bohrs Antwort [22] auf das berühmte

Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen [23], mit dem die Unvollständigkeit der Quantenmechanik demonstriert werden soll. Die Unteilbarkeit der Quantenphänomene bildet einen wesentlichen Baustein von Bohrs Zurückweisung dieses Einwands. Die Erörterung des Gedankengangs von Einstein, Podolsky und Rosen würde an dieser Stelle zu weit führen; ihm ist einer der folgenden Artikel dieser Serie gewidmet. Es sei aber immerhin am Rande erwähnt, daß dabei aus der Auseinandersetzung zwischen Bohr und Einstein über tiefe erkenntnistheoretische Fragen einer der interessantesten Effekte der modernen Quantenmechanik hervorgegangen ist.

Abschließende Bemerkungen

Unsere Darstellung der Bohrschen Interpretation der Quantenmechanik wäre unvollständig ohne ihre Einordnung in das moderne wissenschaftliche Weltbild. In der Zeit seit der Formulierung von Bohrs Konzeption hat sich die Auffassung über die Grundlagenprobleme der Quantenmechanik ständig weiterentwickelt. Die heutige „Standardinterpretation“ stimmt sicherlich nicht mehr mit der Bohrschen Version überein, selbst wenn die meisten Physiker sich als Anhänger der „Kopenhagener Deutung“ bezeichnen. Viele Elemente, wenn nicht die meisten, wurden dabei jedoch aus der statistischen Interpretation übernommen (über die in der nächsten Folge berichtet werden soll). Insbesondere vertritt (schon seit der von Neumannschen Analyse des Meßprozesses) kaum noch jemand die Ansicht, daß ein Meßgerät prinzipiell nicht vom quantenmechanischen Formalismus erfaßt werden kann. Wie schon in der Einleitung dargelegt sind wir trotzdem der Ansicht, daß die Interpretation von Bohr in der Schule mit Gewinn behandelt werden kann.

Zum Schluß sollen daher noch einige grundsätzliche Aspekte erörtert werden, die im Unterricht zu speziellen Problemen Anlaß geben können. Aus wissenschaftstheoretischer Perspektive stellt Bohrs Ansicht der Quantenmechanik einen Sonderfall der wissenschaftlichen Entwicklung dar. Die normale Abfolge von Theorien geht vom Speziellen zum Allgemeinen; üblicherweise erweitert die neue Theorie den Anwendungsbereich der alten und enthält sie als Grenzfall. Als Beispiel kann man das Verhältnis von Newtonscher Mechanik und der speziellen Relativitätstheorie Einsteins heranziehen: Letztere ist korrekt auch für Geschwindigkeiten $v \rightarrow c$ und reduziert sich auf die Newtonsche Theorie für $v \ll c$ (oder $c \rightarrow \infty$).

Diese traditionelle Auffassung, die von vielen als intuitiv einleuchtend empfunden wird, ist in der Kopenhagener Interpretation zugunsten eines eigentümlichen Theoriendualismus aufgegeben: Klassische und Quantenmechanik stehen gleichberechtigt nebeneinander, keine ist fundamentaler als die andere und keine kann aus der anderen abgeleitet werden. Die Natur wird nicht mehr von einer einzelnen grundlegenden Theorie oder einer Hierarchie von Theorien beschrieben, sondern Meßgeräte und Quantenobjekte „leben“ in jeweils eigenen Theorienwelten. Diese recht komplexe Struktur durchschaubar zu machen, könnte im Unterricht schwierig sein.

Eng mit dem Dualismus der Theorien verbunden ist der Umstand, daß die Bohrsche Interpretation dem Menschen und seiner Sphäre angepaßt ist. Um das einzusehen, stelle man sich einen mit Mikrolebewesen bevölkerten Planeten vor, für deren Bewohner es ein alltägliches Geschäft ist, mit Quanteneffekten umzugehen. (Alternativ kann man sich auch eine Situation vorstellen, in der das Plancksche Wirkungsquantum sehr viel größer ist, wie das Gamow in unterhaltsamer Weise getan hat [24]) In dieser Welt hätte man sicherlich eine andere Auffassung von einer quantenmechanischen Messung als die Bohrsche (obwohl der mathematische Formalismus seine Gültigkeit behalten könnte). Speziell die Forderung, daß zu einer Messung klassische Geräte benutzt werden müssen, damit eine eindeutige Mittelbarkeit der Versuchsumstände und Meßergebnisse gegeben ist, würde wahrscheinlich nicht in dieser Form aufgestellt. Die sich daraus ergebende Nicht-Allgemeingültigkeit der Deutung Bohrs gibt unter Umständen ebenfalls Anlaß zu Diskussionen.

Anhang: Heisenbergs Version der Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik wurde in vielen individuell verschiedenen Ausprägungen vertreten. Die neben Bohrs Version bedeutendste ist die von Heisenberg, der historisch viel zur Entstehung der Kopenhagener Deutung beigetragen hat. Heisenberg schreibt über ihre Entstehungsgeschichte [25]: „der Verfasser erinnert sich gern an die intensiven, oft bis spät in die Nacht ausgedehnten Diskussionen mit Bohr, in denen jeder neue Deutungsversuch an wirklichen oder ausgedachten Experimenten auf seine Brauchbarkeit geprüft wurde. Dabei neigte Bohr dazu, die neuen von der Wellenmechanik gefundenen anschaulichen Bilder in die Deutung der Theorie zu verarbeiten, während der Verfasser andererseits versuchte, die physikalische Deutung der Transformationsmatrizen so zu erweitern, daß eine in sich geschlossene, allen möglichen Experimenten gerecht werdende Interpretation entstand“. Diese Aufgabenverteilung schlägt sich auch im Stil der später verfaßten Arbeiten nieder: Während Bohr eher an den allgemeinen Fragen erkenntnistheoretischer Natur interessiert ist, behandelt Heisenberg in seinen Büchern und Aufsätzen viele Gedankenexperimente explizit und quantitativ. Seine im Vergleich zu Bohr sehr viel klarer erscheinenden Formulierungen sind sicherlich hauptsächlich dafür verantwortlich, daß in popularisierten Fassungen der Quantenphysik und in Schulbuchtexten vorwiegend Arbeiten von ihm herangezogen und zitiert werden. Obwohl sich die Auffassungen von Bohr und Heisenberg im großen und ganzen recht ähnlich sind, gibt es doch einige Unterschiede, die im folgenden kurz besprochen werden sollen.

Der Hauptaspekt, der in Heisenbergs Schriften neben die schon geschilderten Gedanken tritt, ist das Verhältnis zwischen subjektiven und objektiven Elementen in der Interpretation der Quantenmechanik. Im Lauf der Zeit verändert sich seine Einstellung dazu. In seinen frühen Schriften vertritt er einen subjektiven Wahrscheinlichkeitsbegriff. Er schreibt z. B.: „Die Unbestimmtheitsrelationen beziehen sich auf den Genauigkeitsgrad unserer gegenwärtigen (gleichzeitigen) Kenntnis der verschiedenen quantenmechanischen Größen. [Ihre Wirkung äußert sich] darin, daß jedes Experiment, das eine Messung etwa des Ortes ermöglicht, notwendig die Kenntnis der Geschwindigkeit in gewissem Grade stört“ [26]. Er benutzt dabei eine „Störungsvorstellung“, nach der der Zustand des zu messenden Mikroobjekts bei einer Messung unkontrollierbar gestört wird.

Später ändert sich seine Ansicht hin zu einer Doppelauffassung: „Die Wahrscheinlichkeitsfunktion vereinigt objektive und subjektive Elemente. Sie enthält Aussagen über Wahrscheinlichkeiten oder besser Tendenzen (Potentia in der aristotelischen Philosophie), und diese Aussagen sind völlig objektiv, sie hängen nicht von irgendeinem Beobachter ab. Außerdem enthält sie Aussagen über unsere Kenntnis des Systems, die natürlich subjektiv sein müssen, insofern sie ja für verschiedene Beobachter verschieden sein können. In besonders günstigen Fällen kann das subjektive Element in der Wahrscheinlichkeitsfunktion gegenüber dem objektiven Element ganz vernachlässigt werden. Die Physiker sprechen dann von einem ‚reinen Fall‘“ [27].

Dies wird verdeutlicht durch seine Analyse des Meßprozesses, der sich von der Bohrschen Fassung teilweise unterscheidet. Er stellt fest, daß bei einer Messung „die Bewegungsgleichung für die Wahrscheinlichkeitsfunktion jetzt den Einfluß berücksichtigen muß, den die Wechselwirkung mit den Meßanordnungen auf das System ausübt. Dieser Einfluß bringt ein neues Element von Unbestimmtheit mit sich. Denn die Meßanordnung muß ja in den Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden; eine solche Beschreibung enthält alle Unsicherheiten bezüglich der mikroskopischen Struktur der Anordnung, die wir schon von der Thermodynamik kennen. Da die Anordnung außerdem mit dem Rest der Welt verbunden sein muß, enthält sie tatsächlich die Unsicherheiten bezüglich der mikroskopischen Struktur der ganzen Welt. Diese Unsicherheiten kann man objektiv nennen, insofern sie ja einfach die Folge davon sind, daß wir das Experiment in den Begriffen der klassischen Physik beschreiben; sie hängen in den Einzelheiten nicht vom

Beobachter ab. Man kann sie subjektiv nennen, insofern sie unsere unvollständige Kenntnis der Welt bezeichnen.

Nachdem die Wechselwirkung stattgefunden hat, enthält die Wahrscheinlichkeitsfunktion das objektive Element der ‚Tendenz‘ oder der ‚Möglichkeit‘ und das subjektive Element der unvollständigen Kenntnis, selbst dann, wenn es sich zunächst um einen ‚reinen Fall‘ gehandelt hatte. Eben aus diesem Grunde kann das Ergebnis einer Beobachtung im allgemeinen nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden“ [27].

Das statistische Element wird also in die Quantenmechanik durch die unvollständige mikroskopische Kenntnis eingeführt, die wir notwendigerweise von den Meßgeräten besitzen, wenn wir sie durch klassische Begriffe beschreiben.

Die Verwendung des Begriffes ‚potentia‘ (im Sinne von Möglichkeiten und Tendenzen) und des zugehörigen Begriffes des Faktischen ist eine weitere Besonderheit der Heisenbergschen Darstellungen (s. auch [28]). „Es muß aber betont werden, daß die Wahrscheinlichkeitsfunktion nicht selbst einen Ablauf von Ereignissen in der Zeit darstellt. Sie stellt etwa eine Tendenz zu Vorgängen, die Möglichkeit für Vorgänge oder unsere Kenntnis von Vorgängen dar“ [27]. In einer berühmt gewordenen Formulierung schreibt er: „Der Übergang vom Möglichen zum Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, so müssen wir davon ausgehen, daß das Wort ‚geschieht‘ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen“ [27]. Damit hängt auch die Reduktion der Wellenfunktion zusammen: „Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems unstetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung geändert, und wir sprechen daher von einem Quantensprung“ [27].

Dieser Artikel beruht teilweise auf einer bereits veröffentlichten Arbeit von B. Schmincke und H. Wiesner [29].

Literatur

- [1] A. I. Rae, *Quantum physics – Illusion or reality?*, Cambridge 1986.
- [2] J. Audretsch, K. Mainzer (Hrsg.), *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze ? – Zur Physik und Philosophie der Quantenmechanik*, Mannheim 1990.
- [3] D. Z. Albert, *Quantum mechanics and experience*, Cambridge 1992.
- [4] J. Baggott, *The meaning of quantum theory – A guide for students of chemistry and physics*, Oxford 1993.
- [5] F. Capra, *Wendezeit*, München 1986.
- [6] W. Jung, H. Wiesner, *Kontroverse Deutungen der Quantenphysik als Gegenstand des Physikunterrichts*, PdN-Ph **33**, 276 (1984).
- [7] T. Litt, *Naturwissenschaft und Menschenbildung*, Heidelberg, 3. Aufl. 1959.
- [8] M. Wagenschein, *Die pädagogische Dimension der Physik*, Braunschweig 1971.

- [9] N. Bohr, *Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik*, in: *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, hrsg. von P. A. Schilpp, Stuttgart 1955; abgedruckt in [30].
- [10] N. Bohr, *Atomphysik und Philosophie – Kausalität und Komplementarität*, Beitrag zur „Philosophy in the Mid-Century“, hrsg. von R. Klibansky, Florenz 1958; abgedruckt in [30], unter dem Titel *Über Erkenntnisfragen der Quantenphysik* auch in [31].
- [11] N. Bohr, *Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik*, Naturwiss. **16**, 245 (1928). Überarbeitete Fassung des Volta-Vortrags vom 16. 9. 1927 in Como; abgedruckt in [32].
- [12] N. Bohr, *Kausalität und Komplementarität*, Erkenntnis **6**, 293 (1937); abgedruckt in [32].
- [13] C. F. v. Weizsäcker, *Zur Deutung der Quantenphysik*, Z. Phys. **118**, 489 (1941).
- [14] C. F. v. Weizsäcker, *The Copenhagen Interpretation*, in: T. Bastin (ed.): *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge 1971.
- [15] K. M. Meyer-Abich, *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität*, Wiesbaden 1965.
- [16] N. Bohr, *Die Einheit menschlicher Erkenntnis*, Vortrag auf dem Kongreß der „Fondation Européenne de la Culture“ in Kopenhagen 1960; abgedruckt in [33].
- [17] N. Bohr, *Einheit des Wissens*, in: *The Unity of Knowledge*, hrsg. v. L. Leary, New York 1955; abgedruckt in [30].
- [18] P. Frank, *Philosophische Deutungen und Mißdeutungen der Quantentheorie*, Erkenntnis **6**, 303 (1936).
- [19] M. Jammer, *The philosophy of quantum mechanics*, New York 1974.
- [20] W. Pauli, *Phänomen und physikalische Realität*, in: ders., Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie, Braunschweig 1961.
- [21] N. Bohr, *Erkenntnistheoretische Fragen in der Physik und die menschlichen Kulturen*, Ansprache beim internationalen Kongreß für Anthropologie und Ethnologie 1938; Nature **143**, 268 (1939); abgedruckt in [30].
- [22] N. Bohr, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Phys. Rev. **48**, 696 (1935); abgedruckt in [31].
- [23] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Phys. Rev. **47**, 777 (1935); abgedruckt in [31].
- [24] G. Gamow, *Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos*, Braunschweig 1980.
- [25] W. Heisenberg, *Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie*, Phys. Bl. **12**, 289 (1956); abgedruckt in [31].
- [26] W. Heisenberg, *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*, Mannheim 1958; 1. Auflage 1930.

- [27] W. Heisenberg, *Physik und Philosophie*, Frankfurt 1977; Ausarbeitung der Gifford lectures 1955/56.
- [28] B. d'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, London 1976.
- [29] B. Schmincke, H. Wiesner, *Zur Quantenphysik in der Schule: Die Bohrsche Fassung der Kopenhagener Deutung*, PdN-Ph. **31**, 257 (1982).
- [30] N. Bohr, *Atomphysik und menschliche Erkenntnis – Aufsätze und Vorträge aus den Jahren 1930 bis 1961*, Braunschweig 1985 (nicht zu verwechseln mit den gleichnamigen Sammelbänden, die 1958 bzw. 1966 erschienen sind und aus denen dieser Band eine Auswahl enthält).
- [31] K. Baumann, R. U. Sexl (Hrsg.), *Die Deutungen der Quantentheorie*, Braunschweig 1984.
- [32] K. v. Meyenn, K. Stolzenburg, R. U. Sexl (Hrsg.), *Niels Bohr 1885-1962 – Der Kopenhagener Geist in der Physik*, Braunschweig 1985.
- [33] N. Bohr, *Atomphysik und menschliche Erkenntnis II*, Braunschweig 1966.

Adressen der Autoren

Dr. Rainer Müller, Sektion Physik der Universität München, Theresienstr. 37, 80333 München,
 Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Sektion Physik der Universität München, Schellingstr. 4, 80333 München,
 Bernhard Schmincke, Plafkampweg 32, 32760 Detmold.