

Quantenmechanik, Beobachtung und Deutung

ALFRED LANDÉ

Ohio State University

Abstract

The doctrine of wave-particle duality and complementarity has been regarded since the late 1920's as the only possible interpretation of observations such as electron diffraction through crystals and screens with two slits as well as other coherence phenomena. Physicists have been unaware that those apparent wave features can be accounted for, without supernatural dual manifestations made palatable by semi-philosophical 'renunciation', by the unitary quantum mechanics of matter particles alone if one only is consistent enough to admit that there are three (rather than only two) conservation laws of mechanics, hence there are three (rather than two) corresponding selection rules, for E , p_φ and also for the linear momentum p , restricting the mechanical activity of time-, angular-periodic, and also of space-periodic systems. This clears up the mystery of dualism in a physical manner without philosophical subtleties and leads to a great simplification of the quantum ideology.

1. *Das Problem der Dualität*

Während der nicht-relativistische Quantenformalismus keinem Zweifel unterliegt, bestehen nach vierzig Jahren immer noch Fragen über seine Deutung. Dabei nimmt der Kopenhagener *Dualismus* eine so vorherrschende Stellung ein, dass abweichende Ansichten sich meistens nur auf Einzelheiten beziehen (siehe die Übersicht in Kap. III dieses Aufsatzes). Im scharfen Gegensatz zu allen diesen Meinungen, die stets eine Dualität in dieser oder jener Form als unvermeidlich betrachten, steht die um 1955 vorgeschlagene *einheitliche Deutung* der Quantenerscheinungen, über die hier kurz berichtet werden soll. Dies ist natürlich nur im Zusammenhang mit einer Kritik der Dualitätslehre möglich. Letztere begann schon 1905 beim lichtelektrischen Effekt und wiederholte sich in schärferem Masse bei der Materienbeugung (1926). Hier trat die Frage auf, wie man die diskreten Reflektionswinkel von Elektronen an Krystallen anders erklären kann als auf Grund von Wellen entsprechend der Bragg'schen Interferenzbeziehung

$$2L \cdot \sin \theta_n = n\lambda \quad (1.1)$$

wobei L den Gitterebnen-Abstand und $\lambda = h/p$ die duale Beziehung zwischen Teilchenimpuls und Wellenlänge darstellt. Da ein physikalischer Umwandlungsauber von Elektronen in breite Wellenzüge abzulehnen ist, hat man nach anderen Erklärungen gesucht. Hier bieten sich nun zwei Wege dar, ein physikalischer Weg und ein philosophisch-sprachlicher Ausweg.

Der philosophische Ausweg besteht darin, dass man zunächst eine physikalische Lösung als unmöglich ansieht und diesen Verzicht dann zum Grundprinzip des Quantendenkens erhöht. So schreibt Rosenfeld (1963) (in deutscher Übersetzung des englischen Originals):

‘Während die grossen Meister sich vergebens plagten, den Widerspruch in Aristotelischer Weise [entweder — oder] durch Zurückführung der einen Ansicht auf die andere zu eliminieren, sah Bohr die Fruchtlosigkeit dieser Versuche. Er wusste [!], dass wir mit diesem Dilemma leben müssen ... und dass das wirkliche Problem darin bestand, die *Sprache der Physik zu verfeinern*, um Raum für die Koexistenz beider Auffassungen zu schaffen.’

Nach Ansicht des Verfassers lässt sich kaum eine schärfere Charakterisierung (oder Selbstanklage) des Kopenhagener Gedankenkreises finden.

Die Sprachverfeinerung besteht darin, dass man *sagt*, es gäbe ‘in Wirklichkeit’ weder Wellen noch Teilchen. Beide seien nur als *subjektive Bilder* klassischer Art aufzufassen, die den Versuchsbedingungen entsprechend ausgewechselt werden können. In einer Nebelkammer gilt das Teilchenbild, am Krystall und an einem Beugungsspalt das Wellenbild. Diese Denkweise wird ergänzt durch das Prinzip der *Komplementarität*: ‘Wo das eine Bild versagt, dort gilt das andere Bild’, was sich nach Bohr auch in der Politik und in anderen menschlichen Angelegenheiten bestätigt.

Wer an diese Errungenschaft philosophischer Sprachverfeinerung gewöhnt ist, wird eine unphilosophische, dafür aber *physikalische Lösung* des Dualitätsproblems für unmöglich gehalten. Sie besteht darin, dass man die Beugungsbilder nicht einem Wechsel vom Teilchenbild zum Wellenbild der einfallenden Materie zuschreibt, sondern der Quantenmechanik des beugenden Körpers, der durch statistisch geregelte Impulsausgaben die Teilchen ablenkt. Die Zahl n in (1.1) wird dadurch aus einer Ordnungszahl der Welleninterferenz zu einer ‘Quantenzahl’, in folgender Weise, die eine besonders schöne Anwendung der Quantentheorie darstellt.

2. Lösung des Problems

Der wesentliche Punkt ist, dass es in der Mechanik nicht nur zwei sondern drei Erhaltungssätze gibt, für die Energie E , den Drehimpuls p_φ und den linearen Impuls p . Ihnen entsprechen nicht nur zwei sondern drei Auswahlregeln, nämlich

$$\Delta E = h/l \quad (2.1a)$$

$$\Delta p_\varphi = h/\varphi \quad (2.1b)$$

$$\Delta p = h/l \quad (2.1c)$$

(2.1a) ist Planck's Regel: Ein System, das eine Zeitperiode τ besitzt, ist dadurch befugt, seine Energie in Quanten $\Delta E = h/\tau$ zu ändern (2.1b) und (2.1c) besagen das entsprechende für Körper mit Winkel- und linearen Perioden φ und l . Da jeder Körper die Winkelperiode $\varphi = 2\pi$ hat, wird aus (2.1b) die Sommerfeld-Wilson'sche Auswahlregel $\Delta p_\varphi = h/2\pi$. Für Atome mit (spektral beobachteten, s.u.) Frequenzen $\nu_n = 1/\tau_n$ gilt Bohr's Frequenzbedingung, $\Delta E = h\nu_n$. Ein Krystall mit Gitterebnen im Abstand L hat die Grundperiode $l = L$ sowie höhere Raumperioden $l = L/n$, ist daher fähig, Impulse der Grösse nh/L auszugeben und aufzunehmen. Stets sind dabei die Erhaltungssätze bei der Wechselwirkung zweier Körper bewahrt. Wenn z.B. ein Teilchen im Winkel θ einfällt und wegen des Energie- und Impulssatzes im selben Winkel reflektiert wird, ändert sich seine Impulskomponente parallel zu L um $2p \cdot \sin \theta$. Für den Zusammenstoss mit dem Krystall gilt also der Impulssatz

$$2p \cdot \sin \theta_n = \Delta p = nh/L \quad (2.2)$$

Diese Gleichung der Mechanik führt zu denselben Winkeln θ_n , die man auch nach Gleichung (1.1) berechnen kann, indem man eine übernatürliche Verwandlung der Elektronen in Wellen nach der Regel $p = h/\lambda$ annimmt. Oder man ändert die Sprache und schiebt alles auf eine Änderung des subjektiven 'Bildes'. Verf. kann es nicht als reine Geschmacksache betrachten, ob man die Materienbeugung einer Doppelverwandlung von 'Bildern' oder einem einheitlichen Quantenprozess zuschreibt. Die wichtige dritte Quantenregel (2.1c) wurde schon 1923 von Duane aufgestellt, ist aber Jahrzehnte lang in der Fachliteratur als Staatsgeheimnis bewahrt worden trotz ihrer entscheidenden Bedeutung für die *physikalische Lösung* des Dualitätsproblems. Eine Sprachverfeinerung und *ad hoc* erfundene Quantenphilosophie ist überflüssig.

Bei dem Beugungsproblem von Elektronen an einem Schirm mit

ein oder zwei Spalten stützt sich die Dualitätslehre stets auf das anscheinende Wunder, dass eine Stelle im Beugungsbild, die durch *einen* Spalt für Elektronen zugänglich ist, *unzugänglich* wird, wenn man den zweiten Spalt *öffnet*. Das scheint in der Tat nur durch Superposition von Wellen entgegengesetzter Phase erklärbar zu sein und wird bis heute als schlagender Beweis für die doppelte Bildersprache angesehen. Das Wunder lässt sich jedoch mit Hilfe der Quantenregel (2.1c) physikalisch erklären. Während nämlich die Perioden l beim Krystall diskrete Werte besitzen, hat ein Schirm mit Spalt ein kontinuierliches l -Spektrum mit einer Intensitätsverteilung, die im Einspalt- und Zweispaltversuch zu verschiedenen Wahrscheinlichkeiten der Ablenkungen $\Delta p = h/l$ führen und auf diese Weise die zwei verschiedenen Beugungsbilder hervorrufen.

Dabei ist es nicht nötig, dass im Krystall-Beispiel ein reflektiertes Elektron alle Gitterebenen 'durchfühlt', oder im Zweispalt-Versuch durch einen der Spalte geht und dabei 'fühlt', ob der andere Spalt offen oder geschlossen war. Das vom Film aufgefangene Elektron mag von irgend einer Stelle der Schirm-Rückseite herkommen, wenn nur im ganzen die Erhaltungssätze gewahrt sind — wie beim Stoss auf das eine Ende einer Kugelreihe die Kugel am andern Ende abfliegt. Wie Bohr stets betonte, betrifft jeder Quantenvorgang eine *Ganzheit*. Im gegenwärtigen Beispiel hängt die Δp -Wirkung von den Perioden l ab, die sich von einem zum andern Ende des Beugers erstrecken, und sogar darüber hinaus ins Vakuum bei der Beugung an einer Halbebene, so unphysikalisch das auch aussehen mag. Die ganze Qu. M. ist ja unphysikalisch! Wie Verf an anderer Stelle betonte, ist ein Spalt keineswegs ein Nichts, sondern ein Nichts mit etwas Herum, und beide liefern ihren Beitrag zum l -Spektrum und dadurch zum gequantelten Impulswechsel $\Delta p = h/l$.

3. Ersatz-Dualität

Wer sich an abwechselnde Bilder als genügende Erklärung physikalischer Probleme gewöhnt hat, wird dazu neigen, die Fahne der Dualität wenigstens dem Namen nach, oder auch unter andern Namen zu retten. So ist es jetzt üblich, statt abwechselnder Bilder ihre gleichzeitige Geltung in allen Fällen zu betonen, gestützt auf die Äquivalenz der Beziehungen (1.1) und (2.2) bei der Beugung. Dabei wird aber vergessen, dass diese Äquivalenz sich nur auf die Winkel θ_n bezieht, nicht aber auf ihren statistischen Aufbau, der einer reinen Teilchenmechanik den Vorzug gibt. Dadurch wird die Äquivalenz völlig zunichte.

Eine andere Version sieht Wellen und Teilchen als objektiv in Raum und Zeit vorhanden an, wobei die deterministischen Wellen als Piloten der statistischen Teilchenverteilung dienen. Nach Born ist es umgekehrt: Die Grundgesetze der Quantenmechanik führen zu statistischen Verteilungen, die wie Welleneffekte aussehen. Die Born'sche Deutung stimmt nicht nur mit der Korpuskulartheorie der Chemie und Elektrolyse überein, sondern wird ganz überzeugend durch die Spuren in Nebelkammern und auch durch den statistischen Aufbau der Beugungsbilder bewiesen, wenn man Duane's Quantenregel für Δp nicht ignoriert.

Hier hört man den üblichen Einwand, dass eine 'Zweite Quantelung' es ermöglicht, sämtliche Erscheinungen, selbst die Bahns Spuren, als Welleneffekte zu deuten. So lässt sich das Rutherford-Bohr'sche Atommodell mit seinen N Elektronen durch mathematische Transformationen als Modell einer gequantelten kontinuierlichen Flüssigkeit auffassen. Also dürfe man keinem der beiden 'Bilder' den Vorzug geben. Dazu ist erstens zu sagen, dass erstens besagte Flüssigkeit keine Wellen λ entsprechend den Teilchenimpulsen $p = h/\lambda$ enthält, so dass man von einer Dualität von Wellen und Teilchen nur sprechen kann, wenn man den Sinn des Wortes *ad hoc* ändert. Zweitens stelle man sich einen Physiker vor, der zunächst nur den äusserst komplizierten nicht linearen Formalismus der Zweiten Quantelung zur Beschreibung der Spektren kennt und dann entdeckt, dass man ihn in die Quantenmechanik von N Teilchen umformen kann, die identisch mit den Elektronen der Kathodenstrahlen sind. Man würde ihn gewiss als den neuen Kopernikus und Newton des Atomgebietes feiern, statt ihn als Finder einer rein formalen Äquivalenz zu degradieren. wie es die Inquisition mit Galilei versuchte. Kurz gesagt, wer das Modell der zweiten Quantelung als gleichberechtigt mit dem N -Elektronenmodell ansieht, um den Dualitätsglauben zu retten, sollte auch das geozentrische Modell der Planetenbahnen als gleichberechtigt mit dem heliozentrischen Modell ansehen, im Widerspruch zu jedem Grundsatz wissenschaftlicher Methode.

Auf den Einwand schliesslich, dass die Dualität eine 'Tatsache' sei, wie man aus den Dichteschwankungen in Gasen mit ihren zwei gesonderten Beiträgen sehen könne, ist zu antworten, dass die Statistik von Fermi und Bose diese Erscheinungen auf Grund der einheitlichen Quantenmechanik von *Gas-Teilchen* erklärt. Ebenso wie bei dem Gegensatz zwischen Bahns Spuren und Beugungsringen bleibt also auch hier nichts anderes von der Dualität übrig als ein Kontrast zwischen offensichtlichen und nicht ganz offensichtlichen

Teilcheneffekten, ein etwas zu bescheidener Sinn des viel bewunderten und viel gescholtenen Begriffs.

In diesem Zusammenhang ist es aufklärend, die verschiedenen Wendungen des Dualitätsdenkens zusammenzustellen:

- (a) *Abwechselnde objektive* Manifestierung der Materie unter verschiedenen physikalischen Versuchsbedingungen.
- (b) *Abwechselnde subjektive* Bilder zur Illustrierung verschiedener Beobachtungen.
- (c) *Gleichzeitige* Existenz von Teilchen und Wellen in Raum und Zeit, wobei die Teilchen von den Wellen geführt werden.
- (d) Gleichzeitig gültige Bilder, die wegen ihrer mathematischen Äquivalenz auf alle Beobachtungen angewendet werden können.
- (e) Gegensatz zwischen *objektiv* vorhandenen Teilchen und *subjektiven* Wellenbildern, letztere daher erst 'seit der Mensch die Bühne betrat' (Jeans).
- (f) Gegensatz zwischen kinematischen und dynamischen Daten in der reinen Partikelmechanik (also ohne Wellen).
- (g) Gegensatz zwischen offensichtlichen und nicht ganz offensichtlichen reinen Partikeleffekten (Schwankungen in Gasen).

Die Liste macht keinen Anspruch auf Vollständigkeit. In Büchern über Physik und Philosophie findet man die verschiedenen Standpunkte nebeneinander und durcheinander vorgetragen in dem unbewussten Bestreben, idealistische, positivistische und realistische Erkenntnislehren je nach Wahl zur Unterstützung des Dualismus in den verschiedenen Formen (a) bis (g) anzurufen, was dann sehr tiefgründig aussieht. Allen Verteidigern der Dualität sei jedoch die Frage vorgelegt, warum man seit vier Jahrzehnten von dem stärksten Gegengrund, der einheitlichen Duane'schen Theorie der Beugung, keine Notiz genommen hat.

4. *Quantensprünge und Resonanz*

Versuche, eine einheitliche Deutung der Quantentheorie zu erreichen, sind stets daran gescheitert, dass man die Δp -Erklärung der Beugung ignorierte. Typisch in dieser Hinsicht ist die bekannte Diskussion zwischen Schrödinger und Born (1953). Auf Grund seiner Wellenmechanik und in Ablehnung der statistischen Interpretation bestand Schrödinger darauf, dass diskrete *Quantensprünge* zwischen stationären Energiezuständen auf Illusion beruhen, und dass alles auf *Wellenresonanz* zurückgeführt werden müsse. Born (1953) verteidigte den entgegengesetzten Standpunkt der reinen Teilchen-

mechanik mit Auswahlregeln für plötzliche Quantensprünge. Damals blieb die Frage unentschieden, und keiner der Diskutanten sah, dass Resonanz und Quantensprünge garnicht im Widerspruch stehen, dass beide sich vielmehr gegenseitig bedingen, wie die folgende Überlegung zeigt.

Niemand bestreitet, dass ein harmonischer Oszillator der Frequenz ν ein Objekt ist, des harmonische Oszillationen der Frequenz ν in *Resonanz* mit einer Strahlungskomponente derselben Frequenz ausführt. Dass ein Oszillator sowohl die Frequenz ν besitzt als auch der Auswahlregel $\Delta E = h\nu$ beim *Energieaustausch* unterliegt, ist ebenso anerkannt wie dass ein Rotator sowohl die Winkelperiode $\varphi = 2\pi$ hat als auch der Auswahlregel $\Delta p_\varphi = h/2\pi$ gehorcht. Beides ist unklassisch, stellt aber die Lage so gut wie möglich dar.

Wenn man aber vom Rotator und harmonischen Oszillator zum anharmonischen Oszillator und dann zu Atomen mit Balmer-ähnlichen Spektren übergeht, wird die übliche Deutung unklar. Bohr's Umkehrung $\nu = \Delta E/h$ des Planck'schen Gesetzes wird allgemein so aufgefasst, dass das Atom nur eine Energieänderung ΔE erleidet, ohne gleichzeitig eine Schwingung $\nu = \Delta E/h$ auszuführen; die Frequenz ν wird nur der Strahlung zugeschrieben, sodass keine Resonanz im Spiel ist (Born's Standpunkt). Bohr war aber stets unzufrieden mit dieser Ansicht. Und sein Korrespondenzprinzip sollte eben zwischen spektralen und atomaren Frequenzen vermitteln. Mir scheint es logisch, dass man wie beim harmonischen Oszillator auch beim Atom *sowohl* Energieänderungen ΔE *als auch* Schwingungen $\nu = \Delta E/h$ in Resonanz mit der Strahlung annimmt. Das wird sogar durch die Quantenmechanik gefordert, weil Übergänge $\Delta E = E_i - E_k$ nur erlaubt sind, wenn das atomare elektrische Moment M einen nicht-verschwindenden Übergangswert oder Matrixelement M_{ik} der Frequenz $\nu = \Delta E/h$ besitzt. Warum dieses periodische Moment M_{ik} nu als 'virtuell' betrachtet wird, ist nicht klar. Meiner Auffassung nach sollte man es als ebenso physikalisch vorhanden ansehen wie sein Gegenstück, die entsprechende Strahlungskomponente.

Dass *sowohl* Energieaustausch *wie auch* Resonanz der Frequenzen verliert und verliessen muss, geht aus dem Erhaltungssatz $\Delta E_1 = -\Delta E_2$ zusammen mit der Quantenbedingung $\Delta E = h\nu$ hervor entsprechend der Gleichung

$$\nu_1 = |\Delta E_1/h| = |\Delta E_2/h| = \nu_2$$

D.h. zwei Körper können Energie nur austauschen, wenn sie sowohl gleiche Niveauunterschiede wie auch gleiche (fälschlich 'virtuell'

genannte) Schwingungsfrequenzen besitzen. Diese Regel ist aber gerade in den wichtigsten Anwendungen verschleiert. Wenn der erste Körper ein Atom und der zweite ein freies Teilchen ist, so kann letzteres seine Energie um jeden beliebigen Betrag ändern, da es keine Periodizität besitzt (im Widerspruch zu dem 'Bild' $\lambda = h/p$ der Dualisten). Und ein Strahlungsfeld ist ebenfalls für jede geforderte Energieänderung bereit, da es Komponenten jeder beliebigen Frequenz ν enthält. Der alte Gegensatz zwischen nur Resonanz (Schrödinger) und nur Quantensprüngen (Born) ist dadurch gelöst.

5. Voraussage, Messung, Existenz

Heisenberg's Quantenregel, $\delta x \cdot \delta p_x \simeq h$, ist ein statistisches Gesetz. Ein Teilchenstrom, der senkrecht auf einen Schirm mit Spalt der Breite δx fällt, wird in ein Bündel von Richtungen θ zerstreut, die zu verschiedenen neu erworbenen Impulskomponenten p_x gehören. Mit Hilfe der Aufprallpunkte auf einem Film oder einem sonstigen Auffänger können die einzelnen p_x -Werte gemessen werden. Man findet dann, dass sie über das Gebiet δp_x statistisch gestreut sind, wie es auch die Theorie der Impulsübertragungen Δp vom Beuger als statistisches Ergebnis fordert. Da die experimentelle Grundlage der Heisenberg'schen Beziehung auf der *Messung einzelner* von δx herkommender p_x -Werte und ihrem Streubereich beruht, ist es, wie K. Popper schon 1934 bemerkte, schwer zu verstehen, warum hinterher diese Messbarkeit einzelner p_x -Werte aus den Ablenkungen θ gelehnet wird, und derer Unmessbarkeit sogar zum Grundprinzip erhoben wird.

Die übliche Antwort lautet hier, dass die einzelnen p_x -Werte (warum nicht auch ihre Gesamtheit?) nur *indirekt* am fernen Film, nicht aber im Spalt oder seiner nächsten Umgebung festgestellt werden können. Darauf ist zu bemerken, dass fast jede Messung, gewiss aber *jede atomare Messung indirekt* ist und Rückschlüsse auf das gesuchte Datum nur auf Grund mehr oder weniger verwickelter Theorie erlaubt. Einen Impuls p_x kann man seiner Definition gemäss, $p_x = m(x_1 - x_2) : (t_1 - t_2)$ nur durch Benutzung zweier Lagen messen, die recht weit voneinander abliegen dürfen, wenn kein beschleunigendes Feld besteht, wie im vorliegenden Fall. Es liegt im Wesen des Impulses und der Geschwindigkeit, nicht in der Quantenphysik, dass man *zwei* Punkte braucht. Die Quantentheorie gibt uns nur über das statistische Streugebiet δp_x vieler Einzelbeobachtungen oder Messungen Auskunft. Es ist nichts Neues, dass bei der Impulsmessung mit

Hilfe eines Weges zwischen zwei Punkten der Impulswert im Endpunkt durch Anprall geändert wird. Heisenberg's Regel handelt von der Unbestimmtheit der einzelnen *Voraussage* und Unmöglichkeit der Preparation eines xp_x -Paares. Dies als eine Unbestimmtheit der *Nachhersage*, d.h. der Messung darzustellen, ist eine willkürliche Umdeutung des Begriffs der Messung. Sie ist offenbar dadurch motiviert, dass man, wegen der Missdeutung der Beugung, schon *a priori* an Welleneigenschaften einzelner Teilchen glaubt. Das heisst aber den Wagen vor das Pferd spannen, besonders wenn dann gesagt wird, dass die Heisenberg'sche Beziehung eine Bestätigung der Dualität darstellt und die angebliche Unmessbarkeit von p_x innerhalb von $h/\delta x$ als unbestreitbare Tatsache angesehen und jedem Studenten als Grundprinzip der Quantenphysik eingepägt wird. *Ein Cliché wird selbst durch ständige Wiederholung nicht zur Wahrheit.*

Von dieser problematischen Trans-Physik angeblicher Messunmöglichkeit ist aber immer noch ein weiter Schritt zur Meta-Physik, die von dem ultra-positivistischen Satz ausgeht: 'Was man nicht messen kann, das existiert nicht'. Nach Bohr und Heisenberg soll es sinnlos sein, einem Teilchen gleichzeitig einen bestimmten Ort und eine bestimmte Geschwindigkeit als existierend zuzuschreiben — ähnlich wie Zeno seinem Pfeil. Deshalb müsse man den Begriff einer Partikel in den eines verschwommenen Wesens, englisch 'Wavicle' genannt, umdeuten, das mit einer *Unbestimmtheit der Existenz* innerhalb der Grenzen δx und δp_x behaftet ist. Diese Umdeutung gründe sich also auf der Gleichung 'Unmöglichkeit der einzelnen Voraussage = Unmöglichkeit einzelner Messung = Unbestimmtheit der Existenz'. Schon das erste Gleichheitszeichen ist fraglich (und nach Ansicht des Verf. falsch). Das zweite Gleichheitszeichen ist aber reine Metaphysik.

Die Quelle der Kopenhagener Metaphysik liegt wieder in der Dualitätslehre: Da eine Welle innerhalb δx keine bestimmte Wellenzahl $\kappa = 1/\lambda$ hat, darf ein Teilchen im Gebiet δx nur einen unbestimmten Impuls haben. (Der Beziehung $\delta x \cdot \delta \kappa \simeq 1$ entspricht $\delta x \cdot \delta p_x \simeq \hbar$.) Denn sonst würde, wie Weisskopf richtig bemerkt, die folgende Katastrophe eintreten:

'Man kann nicht Lage und Geschwindigkeit gleichzeitig *messen*. Könnte man es, dann würde die Koexistenz von Wellen- und Partikel-Eigenschaften jedes einzelnen Objekts zusammenbrechen ... und unsere Deutung des weiten Feldes atomarer Erscheinungen würde nichts als ein Gewebe auf zufälliger Koinzidenz beruhender Irrtümer sein.'

Und Heisenberg behauptet in ähnlichem Sinn (aus dem englischen übersetzt):

‘Es kann nicht geleugnet werden [?], dass die Elementarteilchen der gegenwärtigen Physik enger mit den Wesenheiten Plato’s als mit den Atomen Demokrit’s verwandt sind . . . Denn in der modernen Naturwissenschaft sind nicht mehr die materiellen Dinge primär, sondern Gestalt, mathematische Symmetrie. Und da mathematische Struktur letzten Endes intellektueller Natur ist, so können wir mit Goethe’s Faust sagen: Am Anfang war das Wort — der Logos.’

Hier muss Verf. leugnen, was nicht zu leugnen ist. Für ihn ist ein Elektron selbst in der modernen Quantenphysik nicht eine platonische Idee, sondern ein stets innerhalb 10^{-12} cm konzentrierte Ladung, die (trotz Zeno und Bohr) in jedem Augenblick eine bestimmte Lage und Geschwindigkeit *besitzt*, obwohl man nicht beide gleichzeitig *veraussagen* kann. Glücklicherweise brauchen wir aber nicht zu warten, bis eine besondere Quantenphilosophie den Bau der Atomwelt zusammenhält. Denn das Getriebe erhält sich schon jetzt, und bereits seit 1927, durch die eindeutige Quantenmechanik, über die wir ja alle einig sind, und deren Aufbau der Kopenhagen und Göttinger Gruppe von Physikern zu verdanken ist, selbst wenn ihre neue Erkenntnislehre zuweilen recht willkürlich erscheint und letzten Endes auf Ignorierung der Duane’schen dritten Auswahlregel bei der Beugung beruht.

Literaturverzeichnis

- Born, M. (1953). *British Journal for the Philosophy of Science*, **4**, 95.
 Landé, A. (1965). *New Foundations of Quantum Mechanics*. C.U.P., Cambridge.
 Rosenfeld, L. (1963). *Physics Today*.
 Schrödinger, E. (1952). *British Journal for the Philosophy of Science*, **3**, 3 and 19.